

# 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.



# 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 .....	7
Introducción .....	10
<b>1 Estado del arte.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Objetivos del estudio .....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Objetivo general .....	13
2.1.2 Objetivos Específicos.....	13
2.1.3 Alcances del estudio .....	13
<b>3 Diseño de investigación .....</b>	<b>15</b>
3.1 Tema de investigación .....	15
3.1.1 Unidades Informantes .....	15
3.1.2 Temporalidad del estudio.....	16
3.2 Justificación de la investigación .....	16
3.3 Marco metodológico de investigación.....	16
3.3.1 Enfoque de investigación .....	17
3.3.2 Técnicas de recolección de datos.....	17
3.4 Marco teórico y conceptual de investigación .....	23
3.4.1 Cadena de Valor del Hidrógeno Verde, sus Derivados y Afines.....	23
3.4.2 Investigación y Desarrollo (I+D).....	24
3.4.3 Investigación básica.....	25
3.4.4 Investigación aplicada.....	25
3.4.5 Desarrollo experimental .....	25
3.4.6 Innovación.....	25
3.4.7 Instituciones de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i).....	26
3.4.8 Infraestructura y equipamiento científico y tecnológico de las instituciones y/o Centros I+D+i y de entidades de formación de personal .....	27
3.4.9 Equipamiento científico .....	28
3.4.10 Equipamiento tecnológico.....	28
3.4.11 Equipamiento técnico.....	28
3.4.12 Personal.....	28
<b>4 Resultados del estudio en contexto nacional .....</b>	<b>30</b>
4.1 Centros e instituciones nacionales relacionados con hidrógeno verde y derivados .....	32
4.1.1 Centros e instituciones de I+D+i.....	32
4.1.2 Instituciones de formación de personal .....	38
4.2 Proyectos relacionados con hidrógeno verde y derivados.....	42
4.2.1 Caracterización de los proyectos I+D+i.....	43
4.2.2 Proyecto destacado de los centros I+D+i.....	56
4.2.3 Proyecciones de los centros I+D+i para el año 2030 .....	65
4.2.4 Caracterización de los proyectos para la formación de personal .....	66
4.2.5 Proyecto destacado de instituciones para la formación de personal.....	89
4.2.6 Proyecciones de instituciones para formación de personal para el año 2030.....	94
4.3 Personal de los centros.....	96
4.3.1 Personal de los centros I+D+i.....	96
4.3.2 Personal en proyecto de formación de personal.....	108
4.4 Infraestructura, equipamiento y recursos.....	117
4.4.1 Infraestructura de los centros de I+D+i .....	117
4.4.2 Equipamiento de los centros de I+D+i.....	128
4.4.3 Infraestructura instituciones de formación de personal .....	156
<b>5 Gobernanza y modelos de sostenibilidad nacional .....</b>	<b>158</b>
5.1 Gobernanza e institucionalidad nacional .....	158
5.2 Modelos de sostenibilidad .....	159
5.3 Desafíos de escalabilidad de proyectos .....	163
<b>6 Resultados del estudio en contexto internacional .....</b>	<b>166</b>
6.1 Proyectos internacionales relacionados con hidrógeno verde y derivados.....	171
6.1.1 Centros e instituciones internacionales .....	172
6.1.2 Proyecto destacado de las instituciones internacionales.....	178
6.2 Personal de las instituciones internacionales.....	188
6.3 Infraestructura, equipamiento y recursos de las instituciones internacionales .....	195

6.3.1	Infraestructura de las instituciones internacionales.....	196
6.3.2	Equipamiento de las instituciones internacionales .....	199
<b>7</b>	<b>Gobernanza y modelos de sostenibilidad internacional .....</b>	<b>216</b>
7.1	Gobernanza e institucionalidad internacional .....	216
7.2	Modelos de sostenibilidad .....	217
7.3	Desafíos de escalabilidad de proyectos .....	220
<b>8</b>	<b>Desafíos de infraestructura y equipamiento de los centros I+D+i y de las instituciones para la formación de personal .....</b>	<b>222</b>
8.1	Necesidades y problemáticas en infraestructura .....	222
8.2	Necesidades y problemáticas en equipamiento científico y tecnológico .....	223
8.3	Necesidades y problemáticas en equipamiento técnico .....	224
<b>9</b>	<b>Conclusiones del levantamiento .....</b>	<b>225</b>
9.1	<i>Corto Plazo (hasta 2027).....</i>	226
9.2	Mediano Plazo (hasta 2030).....	227
9.3	Largo Plazo (2030 en adelante).....	228
9.4	Tipologías de equipamiento.....	228
9.4.1	Tipología de equipamiento científico y tecnológico para proyectos relacionados con hidrógeno verde y sus derivados.....	231
9.4.2	Tipología de equipamiento técnico para proyectos relacionados con hidrógeno verde y sus derivados.....	242
<b>10</b>	<b>Costos asociados a cada tipología .....</b>	<b>247</b>
10.1	Costo nivelado del hidrógeno verde .....	248
10.2	Costos de Inversión y operación para cada tipología .....	249
10.2.1	Infraestructura física y edificación:.....	249
10.2.2	Infraestructura eléctrica e insumos.....	251
10.2.3	Producción de hidrógeno verde .....	257
10.2.4	Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados.....	265
10.2.5	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados .....	270
10.2.6	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados.....	275
10.2.7	Producción de derivados de hidrógeno verde.....	279
10.2.8	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados.....	282
10.2.9	Consumo de hidrógeno y derivados para generación de calor o combustión .....	285
10.2.10	Consumo de hidrógeno y derivados para generación de electricidad .....	288
10.2.11	Banco de pruebas para operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados .....	291
10.2.12	Banco de pruebas para mantenimiento de equipos clave de hidrógeno verde y derivados .....	293
10.2.13	Banco de pruebas para simulación y control de sistemas de hidrógeno verde y derivados .....	294
10.2.14	Banco de pruebas para entrenamiento práctico en seguridad operativa .....	296
10.3	Modelos de negocios y sostenibilidad .....	299
10.3.1	Infraestructura física y edificación .....	299
10.3.2	Producción de hidrógeno verde .....	300
10.3.3	Acondicionamiento.....	301
10.3.4	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados.....	302
10.3.5	Producción de derivados de hidrógeno verde.....	303
10.3.6	Consumo de hidrógeno verde y derivados para la generación de calor.....	304
10.3.7	Consumo de hidrógeno verde y derivados para la electricidad .....	305
10.3.8	Banco de pruebas para operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados .....	306
10.3.9	Banco de pruebas para simulación y control de sistema de hidrógeno verde.....	307
10.4	Mecanismos de financiamiento.....	308
<b>11</b>	<b>Propuesta de red de colaboración .....</b>	<b>311</b>
11.1	Objetivos de la Red Nacional de Colaboración:.....	311
11.2	Participantes y Alcance .....	312
11.3	Gobernanza y Sistema de Adhesión .....	313
11.3.1	Dirección y ejecución.....	314
11.3.2	Entidad coordinadora.....	314
11.3.3	Sistema de adhesión .....	314
11.3.4	Criterios de incorporación .....	315
11.3.5	Coordinación y seguridad .....	316
11.4	Sostenibilidad y Modelo de Negocio .....	317
11.4.1	Inversión inicial y financiamiento semilla .....	317
11.4.2	Modelo de Negocio Mixto y Diversificación de Ingresos .....	318
11.4.3	Ingresos operacionales.....	318

11.5	Despliegue gradual al 2030 .....	324
<b>12</b>	<b>Proveedores.....</b>	<b>326</b>
<b>13</b>	<b>Conclusiones generales .....</b>	<b>328</b>
13.1	Puntos críticos y conclusiones generales.....	328
13.1.1	Brechas críticas de equipamiento y capacidades .....	328
13.1.2	Capital humano y gobernanza .....	328
13.2	Proceso de levantamiento de información .....	329
13.3	La Red Nacional de Colaboración .....	329
13.4	Desafíos Estructurales .....	329
13.5	Recomendaciones estratégicas.....	330
13.6	Conclusiones asociadas a los objetivos específicos .....	331
13.7	Consideraciones Finales.....	332
<b>14</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>333</b>
<b>15</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>336</b>
<b>Nomenclatura.....</b>		<b>336</b>
15.1	Visitas nacionales.....	337
15.1.1	Gasvalpo.....	337
15.1.2	QUEMPIN .....	339
15.1.3	Centro Nacional de Pilotaje (CNP) .....	341
15.1.4	Toyota.....	343
15.1.5	Highly Innovative Fuels (HIF) .....	345
15.2	Visitas internacionales.....	347
15.2.1	Universidad de Texas en Austin (UA) .....	347
15.2.2	Universidad de Houston (UH).....	349
15.2.3	Socalgas .....	351
15.2.4	Nacional Renewable Energy Laboratory (NREL) .....	353
15.2.5	Luisiana State University (LSU) .....	355
<b>16</b>	<b>Talleres de validación de resultados.....</b>	<b>357</b>
16.1	Resultados de los talleres asociados a identificación de brechas en equipamiento .....	357
16.2	Resultados de los talleres asociados a la propuesta de Red Nacional de Colaboración en I+D+i en hidrógeno verde y derivados. ....	358
16.3	Tabla de Entrevistas estructurada .....	359
16.3.1	Matriz descriptiva a la categoría Fuentes de Energías Renovables (EFER).....	360
16.3.2	Matriz descriptiva a la categoría Infraestructura para hidrógeno verde, carbono neutral (EIH2V) .....	360
16.3.3	Matriz descriptiva a la categoría Infraestructura para hidrógeno verde, carbono neutral (EEH2V) .....	361
16.3.4	Matriz descriptiva a la categoría hidrógeno verde y su potencial carbono neutral (EH2VPCN) .....	362
16.3.5	Matriz descriptiva a la categoría Proyectos de sostenibilidad de los Centros (EPSC) .....	362
16.3.6	Matriz descriptiva a la categoría Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación (EPH2VDE) .....	364
16.3.7	Matriz descriptiva a la categoría Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación (EDEPH2V) .....	365
16.3.8	Matriz descriptiva a la categoría Formación Técnica Profesional y Entrenamiento de Personal (EFTPEP) .....	366
16.3.9	Matriz descriptiva a la categoría Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con Hidrógeno Verde (EGIH2V).....	367
16.3.10	Matriz descriptiva a la categoría Fuentes de Energías Renovables .....	369
16.3.11	Matriz descriptiva a la categoría Infraestructura para Hidrógeno Verde (carbono neutral) .....	371
16.3.12	Matriz descriptiva a la categoría Hidrógeno Verde y su potencial carbono neutral .....	371
16.3.13	Matriz descriptiva a la categoría Proyectos e Sostenibilidad de los Centros .....	372
16.3.14	Matriz descriptiva a la categoría Producción Hidrógeno Verde, Derivados y Afines para la Exportación .....	376
16.3.15	Matriz descriptiva a la categoría Desafíos de Escalabilidad de Proyectos de Hidrógeno Verde (necesidades y problemáticas).....	377
16.3.16	Matriz descriptiva a la categoría Formación Técnica- Profesional y Entrenamiento de Personal .....	382
16.3.17	Matriz descriptiva a la categoría Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con Hidrógeno Verde.....	384
16.4	Matriz de investigación de fuentes bibliográficas y documental .....	386
16.5	Desafíos de infraestructura y equipamiento que enfrenta Chile para transitar a una economía 100% descarbonizada .....	388
16.5.1	Instrumentos.....	390

## Resumen ejecutivo

El hidrógeno renovable, comúnmente denominado 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 informe presenta una caracterización técnica del equipamiento disponible en las instituciones seleccionadas, incluyendo infraestructura, requerimientos de operación, sistemas de gestión y plataformas digitales. Además, se describen los proyectos de investigación y de formación, sus componentes, objetivos, modalidades de financiamiento y estrategias de divulgación del conocimiento.

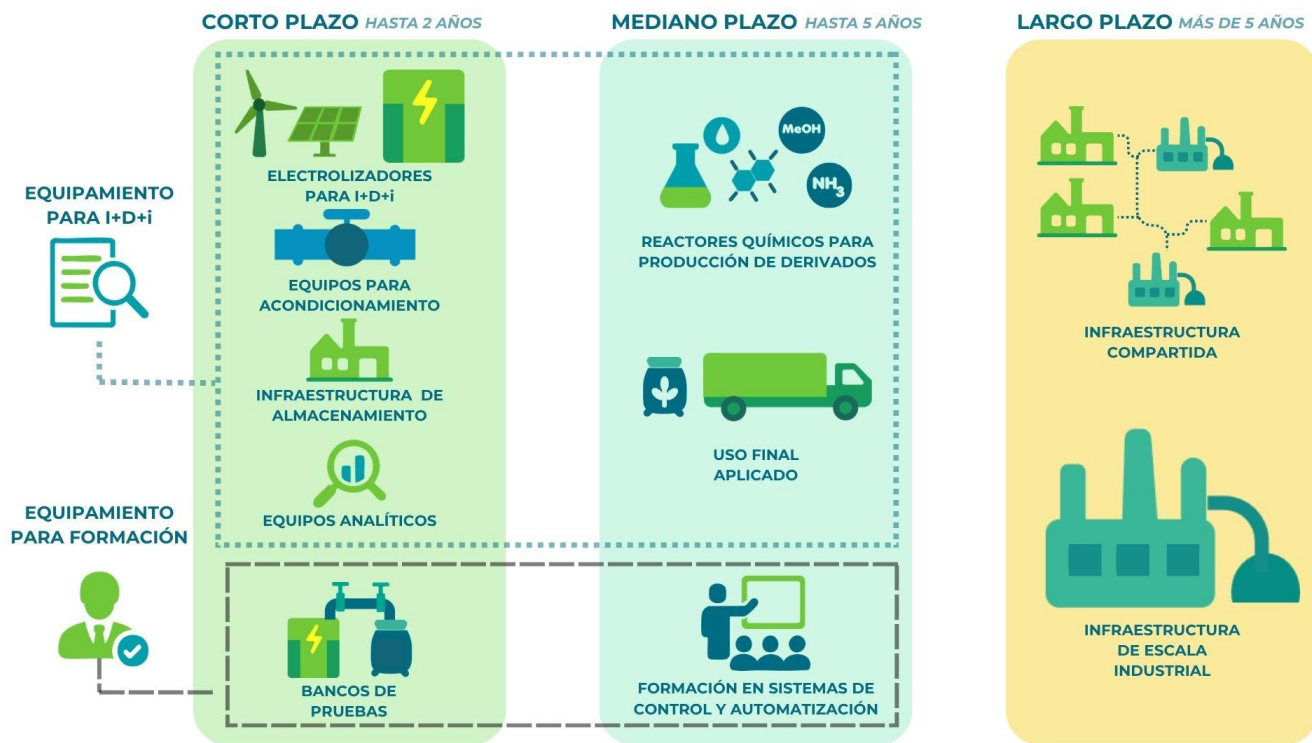
Adicionalmente, el documento muestra los modelos de gobernanza y sostenibilidad implementados por las instituciones, identificando prácticas que permiten articular de manera efectiva capacidades técnicas y humanas. Se releva el perfil de los investigadores, personal técnico y equipos de apoyo involucrados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

El informe profundiza en la caracterización técnica del equipamiento disponible, incluyendo infraestructura, requerimientos operativos, sistemas de gestión y plataformas digitales, y describe los proyectos de investigación y formación, sus objetivos, componentes, fuentes de financiamiento y estrategias de divulgación. Asimismo, se analizan los modelos de gobernanza y sostenibilidad implementados, el perfil del personal investigador y técnico, y las dinámicas de trabajo observadas in situ. Como resultado, se obtiene una visión integrada del estado del arte nacional e internacional, que permite identificar brechas críticas y oportunidades de articulación público-privada, así como definir líneas de investigación estratégicas y programas de formación con impacto territorial.

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, dado que los centros de formación carecen de infraestructura real para prácticas de alta presión o celdas de combustible.

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.



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 la Unión Europea, Estados Unidos, 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

El desarrollo del hidrógeno verde a nivel internacional se encuentra en una fase de consolidación acelerada. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), la demanda global de hidrógeno alcanzó los 95 millones de toneladas en 2022. En ese año, la producción de hidrógeno de bajas emisiones fue inferior a 1 millón de toneladas, representando apenas el 0,7 % de las aplicaciones globales. Además, la producción a partir de electrólisis del agua se mantuvo relativamente baja, por debajo de las 100 mil toneladas de hidrógeno, sin embargo, se identificó un crecimiento del 35 % respecto al año anterior [8].

En la Unión Europea, la estrategia continental plantea la instalación de al menos 40 GW de capacidad de electrólisis para 2030 y la producción de 10 millones de toneladas de hidrógeno verde, impulsando estándares comunes, incentivos a la industria y mecanismos de financiamiento a través del European Green Deal [2]. Esta hoja de ruta no solo contempla metas tecnológicas y productivas, sino que incorpora de forma explícita el fortalecimiento de capacidades científicas y formativas como una condición habilitante para su implementación. En este marco, se ha promovido el desarrollo de centros tecnológicos especializados, como el Clean Hydrogen Joint Undertaking, orientado a financiar proyectos colaborativos de I+D+i en tecnologías clave para la cadena de valor del hidrógeno [9]. Además, se ha potenciado la articulación con programas educativos y de formación técnica como TeachHy entre 2020 y 2022, que busca estandarizar y difundir competencias profesionales en el sector [10]. Estas acciones se complementan con plataformas de cooperación como Hydrogen Europe y la iniciativa 2x40 GW, que promueven la creación de hubs tecnológicos y redes de conocimiento entre industria, universidades y gobiernos [11].

Por su parte, Estados Unidos ha puesto en marcha una estrategia integral para el despliegue del hidrógeno limpio, destacando la creación de siete centros regionales “H2Hubs” con una inversión federal de 7.000 millones de dólares. Estos hubs tienen como objetivo producir más de tres millones de toneladas métricas de hidrógeno limpio al año, aproximadamente un tercio de la meta nacional para 2030, además de catalizar más de 40.000 millones de dólares en inversiones privadas y generar decenas de miles de empleos técnicos en distintos territorios [12]. Complementariamente, el Departamento de Energía lanzó la iniciativa “*Hydrogen Shot*”, como parte del programa “Energy Earthshots”, cuyo propósito es reducir el costo del hidrógeno limpio a 1 USD/kg en una década, acelerando así el escalamiento industrial, la innovación tecnológica y la articulación entre gobierno, industria y centros de investigación [13]. No obstante, a pesar de estos esfuerzos institucionales, la actual administración estadounidense (al 2025) ha mostrado señales contradictorias respecto a la transición energética, disminuyendo énfasis político en las energías limpias y favoreciendo políticas que aún sostienen el uso de combustibles fósiles. Esta ambigüedad ha generado incertidumbre sobre la continuidad del compromiso federal con las metas climáticas, lo que refuerza la necesidad de establecer marcos regulatorios robustos que den estabilidad a largo plazo a este tipo de estrategias.

Por su parte, Estados Unidos ha puesto en marcha una estrategia integral para el despliegue del hidrógeno limpio, destacando la creación de siete centros regionales “H2Hubs” con una inversión federal de 7.000 millones de dólares. Estos hubs tienen como objetivo producir más de tres millones de toneladas métricas de hidrógeno limpio al año, aproximadamente un tercio de la meta nacional para 2030. Además, se proyecta que catalizarán más de 40.000 millones de dólares en inversiones privadas y generarán decenas de miles de empleos técnicos en distintos territorios.

En paralelo, Estados Unidos ha fortalecido su ecosistema de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) a través del Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO) del Departamento de Energía, que lidera programas de innovación en producción, almacenamiento, distribución y usos del

hidrógeno [14]. Esta estrategia incluye también el desarrollo de la fuerza laboral mediante programas federales como “H2EDGE” [15], para la creación de contenidos formativos, certificaciones profesionales y alianzas con instituciones académicas y la industria [16].

En este panorama, China destaca por su volumen y velocidad de implementación. Según IEA Hydrogen, el país tiene más de 300 proyectos en desarrollo, siendo el mayor fabricante de electrolizadores del mundo. Su hoja de ruta nacional establece como metas la producción masiva de hidrógeno renovable, el desarrollo de redes logísticas e infraestructura de distribución y la estandarización normativa [5]. En dicho país, se han implementado estrategias significativas para fortalecer el ecosistema de investigación, desarrollo e innovación en hidrógeno a través del “Programa Nacional Clave de Investigación y Desarrollo” (2018-2020), que ha movilizado aproximadamente 78 millones USD para financiar 27 proyectos centrados en toda la cadena de valor: un 52% en tecnologías de pilas de combustible, un 19% en producción de hidrógeno, un 22% en almacenamiento y un 7% en estaciones de repostaje. En 2021 la distribución se distribuyó entre desarrollo de electrolizadores y aplicaciones finales, y se prevé reforzar esta línea con inversiones directas desde presupuesto central e instrumentos financieros para consolidar un ecosistema de innovación robusto en energías limpias [17].

En contraste con las estrategias integradas observadas en economías avanzadas, Chile enfrenta desafíos estructurales significativos para consolidar un ecosistema de hidrógeno verde robusto. A pesar de contar con la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030, el país aún carece de una red articulada de instituciones de investigación, desarrollo e innovación, presentando brechas importantes en infraestructura científica, equipamiento especializado y capacidades territoriales [7]. La desconexión entre investigación aplicada, formación de capital humano y necesidades reales de la industria limita la capacidad de generar soluciones tecnológicas escalables y adaptadas al contexto nacional. A diferencia de la Unión Europea, donde existen consorcios tecnológicos cofinanciados como el Clean Hydrogen Joint Undertaking [9], o Estados Unidos, que ha institucionalizado programas como “H2EDGE” para formación técnica avanzada [15], en Chile la vinculación sistemática entre universidades, centros de formación técnica, sector privado y gobierno aún es incipiente. Asimismo, mientras países como China movilizan inversiones públicas estratégicas en investigación aplicada y despliegue tecnológico, en Chile los fondos destinados a estas líneas tienden a ser limitados y discontinuos respecto a la hoja de ruta tecnológica de largo plazo. Estas brechas refuerzan la necesidad de implementar acciones coordinadas que fortalezcan las capacidades nacionales de I+D+i, infraestructura formativa y mecanismos de transferencia tecnológica, si el país aspira a posicionarse competitivamente en la cadena de valor global del hidrógeno verde.

Los países líderes en esta industria están invirtiendo sostenidamente en I+D+i, normalización técnica y formación de capacidades. Chile cuenta con ventajas comparativas excepcionales en recursos naturales, como el desierto de Atacama, que presenta la mayor radiación solar del planeta con niveles que superan los 3.800 kWh/m<sup>2</sup> anuales [18], y la región de Magallanes con un potencial eólico relevante considerando velocidades promedio del aire de entre 30 y 40 km/h a 100 metros de altura [19], equivalente a cinco veces la capacidad instalada total del país. Estos atributos posicionan a Chile como uno de los territorios con mayor potencial para el desarrollo de energías renovables a nivel mundial. No obstante, el país requiere avanzar en la construcción de una infraestructura científica y tecnológica distribuida, con foco en formación de capital humano, innovación aplicada y articulación territorial. Esta brecha justifica la realización del presente estudio como un insumo técnico estratégico para apoyar decisiones de política pública e inversión orientadas al despliegue sostenible del hidrógeno verde y sus aplicaciones.

## 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. Se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que estructuran el diseño metodológico, delimitan el alcance del análisis y guían la recolección y sistematización de la información en torno a las capacidades, brechas y proyecciones asociadas al desarrollo del hidrógeno verde en Chile.

### 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, 2 y 3.

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 para realizar I+D+i y entrenamiento técnico profesional en toda la cadena de valor.
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 trata sobre los siguientes ámbitos de observación y análisis a nivel nacional como internacional, a saber:

- Capacidades científicas-tecnológicas, es decir, caracterización del personal y equipamiento científico y tecnológico relacionadas con proyectos y actividades I+D+i en torno al hidrógeno verde, derivados y afines.
- Infraestructura: Laboratorios, centros de pilotaje y/o experimentación, entre otros, presentes en las instituciones y/o centros de I+D+i y formativos con relación al hidrógeno verde.
- Proyectos relacionados con el hidrógeno verde, derivados y afines que se ejecutan tanto en el contexto nacional como internacional.

- Desafíos actuales y futuros a partir de necesidades y problemáticas, específicamente para el contexto chileno, sobre I+D+i y formación de personal con relación a toda la cadena de valor del hidrógeno verde.
- Experiencias, exitosas y destacadas, en materias de I+D y de entrenamiento de personal implementadas a partir de proyectos a nivel internacional para hidrógeno verde, derivados y afines.

## 3 Diseño de investigación

Este capítulo presenta el diseño metodológico de la investigación y su justificación, con el objetivo de explicitar los elementos considerados y los factores clave que guiaron la construcción de los instrumentos utilizados en el proceso de levantamiento de información. Se describen las decisiones metodológicas adoptadas, los criterios de estructuración de las encuestas y entrevistas, así como la lógica que orientó las visitas en terreno.

Asimismo, se exponen los conceptos centrales que sirvieron de base para estructurar el levantamiento de datos, considerando tanto el marco analítico general como las categorías técnicas asociadas a los objetivos del estudio. El propósito de esta sección es proporcionar trazabilidad metodológica, asegurar la coherencia entre los objetivos del estudio y los instrumentos aplicados, y fundamentar el enfoque seleccionado para capturar información relevante, válida y representativa respecto a las capacidades, brechas y proyecciones de las instituciones vinculadas al desarrollo del hidrógeno verde. En las siguientes secciones se presentan los principales conceptos que conforman el diseño de la investigación.

### 3.1 Tema de investigación

La investigación se centra en las instituciones de formación de capital humano y centros de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) que desarrollan proyectos relacionados con el hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines en Chile. El estudio busca 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 ello, se consideran experiencias internacionales exitosas y destacadas, tanto en materia de I+D como en el entrenamiento de personal para la cadena de valor del hidrógeno verde.

#### 3.1.1 Unidades Informantes

Las unidades informantes corresponden a las personas o grupos seleccionados para entregar información primaria en el marco del estudio, en función de su experiencia, conocimiento técnico y vínculo directo con los procesos de investigación, desarrollo, innovación o formación de personal en torno al hidrógeno verde. Estas unidades fueron seleccionadas de forma intencionada, bajo un criterio de experticia temática y representatividad institucional, considerando tanto instituciones nacionales como internacionales.

De acuerdo con la literatura metodológica, las unidades informantes deben ser identificadas en función de su capacidad para proporcionar información detallada, pertinente y contextualizada sobre el fenómeno en estudio, más que por su representatividad estadística [20].

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

### 3.1.2 Temporalidad del estudio

Estudio transversal que consideró la sistematización de información a partir de la observación, cuantificación, cualificación y posterior análisis de datos considerando una temporalidad referencial a partir del año 2022 al primer trimestre del año 2025.

La elección de este período responde a dos criterios fundamentales. En primer lugar, a una consideración jurídica-formal, ya que en Chile se reconoce como centro de I+D a aquellas instituciones que pueden acreditar, al menos, un proyecto asociado a investigación básica, investigación aplicada o desarrollo tecnológico en ciencias o ingeniería, o bien demostrar experiencia en estas actividades dentro de los 36 meses previos a la presentación de antecedentes para su acreditación. En segundo lugar, se trata de una decisión metodológica, coherente con el enfoque transversal adoptado, que permite relacionar variables en marcos temporales definidos para identificar patrones causales, relacionales o comparativos. Así, se busca describir el fenómeno de estudio a partir de sus características observables, considerando las restricciones propias de los instrumentos de recolección de datos empleados.

## 3.2 Justificación de la investigación

La realización del estudio considera proponer e impulsar el desarrollo de soluciones para las instituciones y/o centros de I+D+i y entidades de formación de personal con proyectos para una o más etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde, sus derivados y afines a nivel nacional. En este sentido, la investigación tiene por objeto levantar las siguientes iniciativas:

- Diseñar acciones para fortalecer el equipamiento científico, tecnológico y técnico pensado en proyectos I+D+i y formativos sobre el hidrógeno verde considerando las particularidades geográficas y territoriales de Chile.
- Crear una Red Nacional para desarrollar proyectos de I+D+i sobre el hidrógeno verde.
- Crear una Red Nacional para la formación técnica y profesional relacionada en la industria del hidrógeno verde, sus derivados y afines considerando el contexto geográfico y territorial.
- Proponer tipologías de infraestructura científica, equipamiento tecnológico y técnico, con estimación de costos, planes de sostenibilidad, información geográfica y de personal necesario, para satisfacer los desafíos actuales y futuros de los centros de I+D+i y formativos (perfiles técnicos) identificados para Chile.
- Proponer una Red Nacional, con fines de provisión de equipamientos, colaboración y eficiencia (costos y operacional), para el uso de las instalaciones e infraestructura científica, equipamiento tecnológico y técnico para desarrollar proyectos de I+D+i y formativos en torno al hidrógeno verde, sus derivados y afines.

## 3.3 Marco metodológico de investigación

Esta sección describe el marco metodológico que orientó el desarrollo de esta investigación. Se detallan los fundamentos técnicos y analíticos que guiaron el diseño del estudio, la construcción de instrumentos de recolección de información, la selección de unidades informantes y los criterios aplicados para el levantamiento y análisis de datos. La metodología adoptada responde a los objetivos generales y específicos del estudio, buscando asegurar la validez, coherencia y pertinencia de los resultados obtenidos. Asimismo, se presenta el enfoque mixto empleado, que combina técnicas

cualitativas y cuantitativas, y se justifica su aplicación en función de la complejidad del objeto de estudio y la diversidad de actores involucrados en el ecosistema de investigación, desarrollo, innovación y formación de capital humano en torno al hidrógeno verde. Esta sección constituye la base estructural que da soporte a los hallazgos y conclusiones expuestos en los capítulos posteriores.

### 3.3.1 Enfoque de investigación

El diseño de estudio responde a una modalidad mixta de investigación, a partir de un enfoque cualitativo y cuantitativo de información, de tipo no experimental con una temporalidad transversal y de características descriptivas.

### 3.3.2 Técnicas de recolección de datos

La investigación consideró un proceso de recolección de información a partir de cuatro estrategias para abordar el fenómeno a estudiar, entre ellas: la investigación documental o de fuentes bibliográficas; entrevistas; encuestas y; trabajo de terreno en instituciones y/o centros informantes definidos por la investigación.

Respecto de los instrumentos para la recolección de información, hay que considerar que la pauta de entrevista como los cuestionarios para las encuestas y el trabajo de terreno, estuvieron sujetos al principio de confiabilidad, es decir, al grado en que un instrumento produce resultados consistentes y coherentes, y al principio de validez, el cual se refiere, en términos generales, al grado en que los instrumentos miden con exactitud el conjunto de variables que se pretenden cuantificar y cualificar. Es decir, estos instrumentos reflejan las conceptualizaciones teóricas o abstractas a través de sus indicadores empíricos.

A continuación, se describe cada uno de los instrumentos de recolección de información utilizadas por el estudio.

#### 3.3.2.1 Investigación de fuentes bibliográficas de información

La revisión de literatura y de documentos técnicos, normativos, académicos y gubernamentales, tanto a nivel nacional como internacional, constituye la técnica principal utilizada para aproximarse al estado del arte del objeto de estudio. Esta etapa inicial permite obtener una visión actualizada y amplia sobre el desarrollo del hidrógeno verde y su ecosistema de investigación, desarrollo e innovación. A su vez, entrega insumos fundamentales para la definición del marco teórico y conceptual, así como para la identificación de variables clave y criterios metodológicos que orientan el desarrollo del estudio. Esta revisión técnica especializada representa, por tanto, el punto de partida para sustentar el análisis posterior y la construcción de propuestas fundamentadas.

Para mayores detalles sobre el estudio de fuentes bibliográficas revítese la “Matriz de investigación de fuentes bibliográficas y documental” en *Anexo N°77.7*.

#### 3.3.2.2 Entrevistas

La entrevista se empleó como técnica cualitativa principal para el levantamiento de información en esta investigación. Esta herramienta se basa en una conversación dirigida entre un entrevistador y uno o más informantes clave, representantes de instituciones dedicadas a la investigación, desarrollo e innovación o a la formación de personal técnico-profesional en hidrógeno verde. El entrevistador

conduce la instancia a partir de una pauta previamente estructurada, facilitando tanto el desarrollo de preguntas como la escucha activa de las respuestas, las cuales están condicionadas por la experiencia, conocimientos, nivel de responsabilidad institucional y rol del entrevistado en su organización.

De acuerdo con los lineamientos establecidos en las bases técnicas de la consultoría, se definió una muestra compuesta por un total de veinte entrevistas: diez aplicadas a instituciones de alcance nacional y diez a entidades internacionales. Las entrevistas se realizaron en dos modalidades complementarias. Por una parte, se llevaron a cabo encuentros presenciales en terreno y, por otra, reuniones telemáticas a través de plataformas virtuales. En ambos casos, se convocó a informantes clave con experiencia directa en las temáticas abordadas, quienes, previa invitación formal, accedieron a participar en una reunión calendarizada para la aplicación del instrumento.

En varias de las visitas realizadas a instituciones nacionales e internacionales, se aprovechó la instancia presencial para aplicar la pauta de entrevista directamente en terreno, complementando así la observación directa con el levantamiento estructurado de información.

La pauta de entrevista única fue diseñada con base en siete módulos temáticos, los cuales agrupan un total de diecisiete preguntas. Los ámbitos abordados en la pauta fueron los siguientes:

- Producción de hidrógeno verde y fuentes de energía renovable
- Potencial de descarbonización
- Proyecto de sostenibilidad de la institución
- Producción de hidrógeno verde para la exportación
- Escalabilidad de actividades y proyectos en torno al hidrógeno verde
- Formación técnico-profesional y/o de entrenamiento de personal
- Gobernanza e institucionalidad en torno al hidrógeno verde

El ciclo de la entrevista considera etapas que van, desde la construcción de pauta de entrevista, pasando por procesos de validación y ajustes del instrumento con la correspondiente capacitación del personal entrevistador, hasta la organización, análisis y presentación de resultados obtenidos por esta instancia. Dicho ciclo se ilustra a continuación según la *Figura N°1*.



Figura N°1 Ciclo de construcción, aplicación y resultados de la técnica de entrevistas para el estudio sobre la infraestructura y el equipamiento científico, tecnológico y técnico de instituciones y/o centros I+D y de formación de personal, chilenos e internacionales, con proyectos en torno al hidrógeno verde. *Para más detalles respecto a los instrumentos ver el Anexo 16.5.1.*

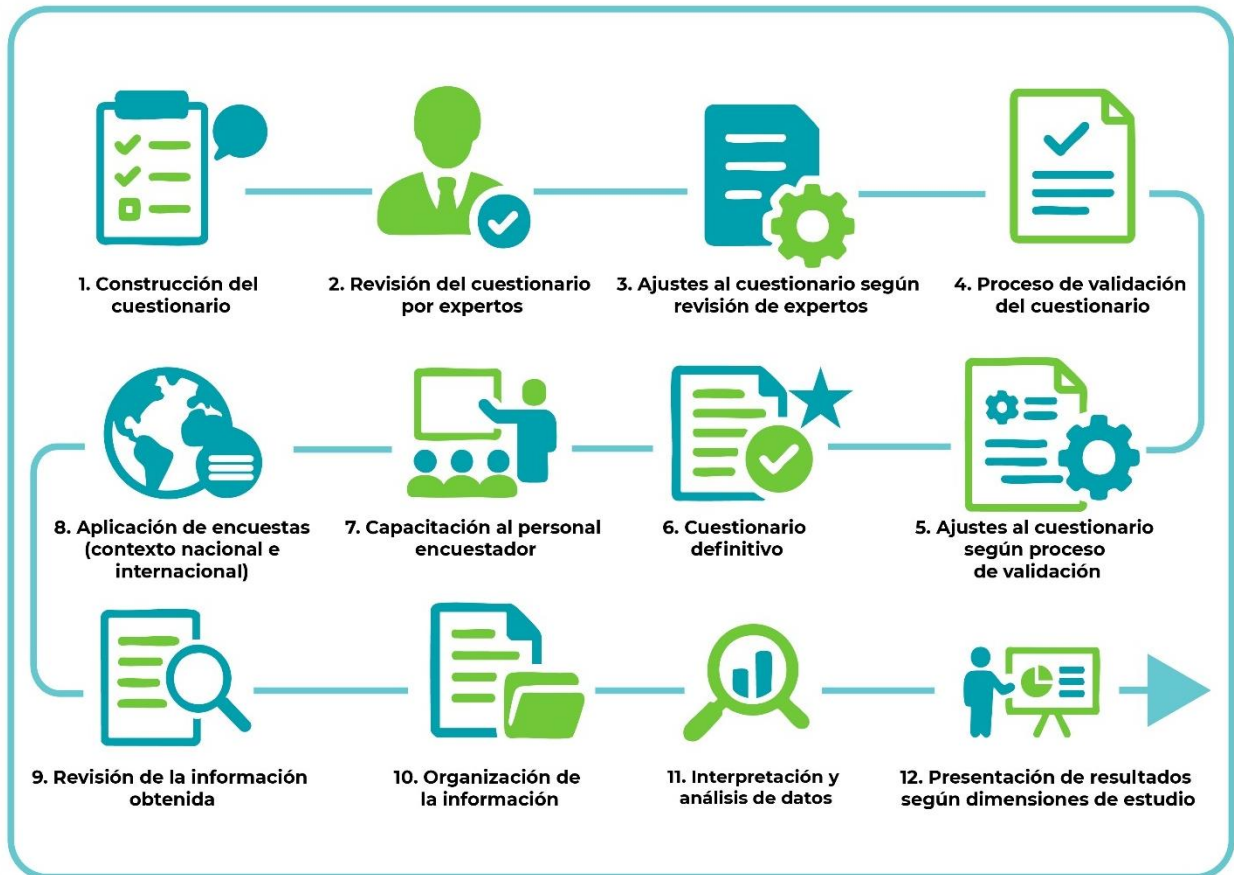
### 3.3.2.3 Encuestas

La encuesta constituye una de las técnicas fundamentales empleadas en este estudio para el levantamiento de información estructurada. En términos metodológicos, se define como un instrumento basado en un cuestionario compuesto por un conjunto de preguntas formuladas con el objetivo de recopilar información cuantificable y cualitativa, vinculada a variables previamente operacionalizadas a partir del marco teórico y conceptual del estudio.

Esta técnica resulta eficaz para estandarizar la observación y asegurar la comparabilidad de los datos, permitiendo aislar dimensiones de análisis relevantes para el estudio y asociarlas a características específicas de las instituciones participantes. Su aplicación facilita la identificación de patrones, brechas y capacidades existentes en el ecosistema nacional e internacional del hidrógeno verde, en concordancia con los objetivos planteados en las bases técnicas.

El ciclo de desarrollo del cuestionario comprendió varias etapas: diseño preliminar del instrumento, procesos de validación y ajuste, elaboración de su versión final, y capacitación del equipo encargado

de su aplicación. Posteriormente, se ejecutó el levantamiento de campo, seguido por la organización, análisis y sistematización de los resultados obtenidos. Estas etapas garantizan la calidad metodológica del instrumento y la trazabilidad de los datos recopilados. El detalle del proceso se presenta en la *Figura N°2*.



*Figura N°2 Ciclo de construcción, aplicación y resultados de la técnica de encuesta sobre la infraestructura y el equipamiento científico, tecnológico y técnico de instituciones y/o centros I+D y de formación de personal, chilenos e internacionales, con proyectos en torno al hidrógeno verde.*

Sobre la organización del cuestionario, puede señalarse que se estructuró con base a siete (7) módulos, para el contexto nacional y cinco (5) módulos para el contexto internacional, los módulos o dimensiones de estudio y análisis se detallan a continuación en la *Tabla N°1*.

*Tabla N°1 Estructura de las encuestas según contexto nacional e internacional. Módulos 7.*

Módulo	Contexto nacional	Contexto Internacional
1	Identificación de centros I+D+i e instituciones para la formación de personal en torno al hidrógeno verde, sus derivados y afines	Identificación de centros I+D e instituciones para la formación de personal en torno al hidrógeno verde, sus derivados y afines
2	Propósito de los centros I+D+i e instituciones para la formación de personal	Propósito de los centros I+D e instituciones para la formación de personal
3	Proyectos I+D+i y para la formación de personal	Proyectos I+D y para la formación de personal
4	Infraestructura y equipamiento científico, tecnológico y técnico	Infraestructura y equipamiento científico, tecnológico y técnico
5	Personal que se desempeña en centros I+D+i e instituciones para la formación de personal	Personal que se desempeña en centros I+D e instituciones para la formación de personal
6	Desafíos de infraestructura y equipamiento científico, tecnológico y técnico de los centros I+D+i	No aplica
7	Desafíos de infraestructura y equipamiento científico, tecnológico y técnico de las instituciones para la formación de personal	No aplica

El criterio de exceptuar al contexto internacional de la dimensión 6 y 7, correspondiente a los desafíos, actuales y futuros, considerando como horizonte el año 2030, sobre la infraestructura y equipamiento de las instituciones y/o centros de I+D tanto así como de las entidades para la formación de personal, se debe a qué, la problematización de la investigación radica en contextualizar el fenómeno con especificidad al ámbito nacional, es decir, considerando criterios, entre otros, de territorialidad, geografía y gobernanza para observar el grado de desarrollo o madurez de la tecnología y equipamiento presentes en Chile con relación al hidrógeno verde, sus derivados y afines, mientras que, a modo referencial y complementario, la investigación considera observar, levantar y comunicar información de experiencias internacionales, exitosas y destacadas, en materia de I+D y de formación de personal, para toda la cadena de valor del hidrógeno verde.

La muestra está definida en función de las bases para la licitación de la consultoría que demanda el estudio, es decir, se considera la aplicación de un mínimo de veinte (20) encuestas a instituciones y/o centros relacionados con proyectos sobre hidrógeno verde, sus derivados y afines para el contexto nacional y, a modo referencial, se considera una muestra similar de encuestas para el contexto internacional.

La aplicación de los cuestionarios, para ambos contextos en modalidad exclusivamente virtual, es acompañada por personal de QUEMPIN, previo a la invitación de personal clave de aquellas unidades informantes (instituciones y/o centros de I+D y entidades para la formación de personal) a ser parte del estudio, para que, una vez haya aceptación de la instancia, se procede a planificar la aplicación del instrumento para la recolección de información relevante para la investigación.

### 3.3.2.4 Visitas a terreno

El trabajo de terreno permitió realizar un levantamiento de información preciso y detallado, directamente con actores involucrados en la operatividad, logística, administración y diseño de estrategias o proyectos vinculados al desarrollo productivo o a los procesos formativos relacionados con la cadena de valor del hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines. Esta herramienta metodológica ofreció la posibilidad de observar en terreno las condiciones reales de funcionamiento, así como el entorno físico (infraestructura y equipamiento) en el que operan las instituciones y centros

informantes. Además, facilitó la interacción directa con profesionales idóneos y especialistas, lo que permitió recoger percepciones cualificadas sobre necesidades, problemáticas, desafíos operativos y estratégicos, así como fortalezas y proyecciones institucionales en función del contexto social, económico y territorial.

El trabajo de terreno contemplaba originalmente la realización de un total de ocho (8) visitas, distribuidas en cinco (5) a nivel nacional y tres (3) a nivel internacional, de acuerdo con lo establecido en las bases técnicas de la licitación del presente estudio. Sin embargo, en función de las condiciones operativas y las oportunidades de coordinación con instituciones clave, fue posible concretar las cinco (5) visitas previstas en el contexto nacional y, adicionalmente, ampliar el alcance internacional con un total de cinco (5) visitas, es decir, dos (2) más de las inicialmente contempladas. Esta ampliación permitió fortalecer la recopilación de información cualitativa y contextual para este instrumento, mejorando la representatividad y profundidad del análisis.

### 3.3.2.5 Talleres para la validación de información levantada

Los talleres son actividades cuyo propósito es validar y/o complementar una propuesta que contiene la identificación de las necesidades nacionales de equipamiento científico, tecnológico y técnico necesarias para Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) y la formación de personal en un ámbito, técnico y profesional para toda la cadena de valor del Hidrógeno Verde (hidrógeno verde), sus derivados y afines.

La propuesta de estudio a validar es resultado de la investigación sobre la infraestructura y equipamiento I+D+i en torno al hidrógeno verde realizadas en Chile, considerando experiencias, destacadas y exitosas, a nivel internacional.

El total de talleres considerados es de cuatro (4) instancias o jornadas únicas, cuya modalidad implica realizar uno (1) taller virtual, a través de plataformas correspondientes y tres (3) talleres presenciales distribuidos en tres regiones del país: Concepción, Región del Biobío; Punta Arenas, Región de Magallanes y la Antártica Chilena y; Antofagasta, Región de Antofagasta.

La metodología considerada por cada taller está relacionada con una estrategia participativa, es decir, a partir de la conformación de grupos de discusión (mesas de trabajo para talleres presenciales y salas virtuales para el taller telemático) con actores integrantes del ecosistema de ciencia y tecnología relacionados con el mundo del hidrógeno verde, sus derivados y afines. Estos trabajarán sobre una pauta con resultados del estudio, la cual discutirán, observarán y/o levantarán recomendaciones sobre los mismos con base a sus conocimientos; intereses; experiencia en la materia; desempeño laboral; necesidades de desarrollo de la industria del hidrógeno verde según infraestructura y equipamiento; territorialidad; entre otros factores.

La dinámica de las jornadas está pauteada según un cronograma que involucra las siguientes actividades:

- Inscripción de participantes
- Saludos y bienvenida a los participantes a la jornada
- Presentación de resultados del estudio a validar
- Encuadre metodológico (conformación de mesas de trabajo)
- Discusión grupal sobre los resultados de la investigación atendiendo a la propuesta de necesidades de equipamiento científico, tecnológico y técnico
- Desarrollo de observaciones, recomendaciones y/o sugerencias a la propuesta de resultados de estudio

- Presentación de resultados por mesas de trabajo
- Plenaria final y clausura del taller

### 3.4 Marco teórico y conceptual de investigación

Esta sección presenta los principales conceptos, enfoques y definiciones que estructuran la investigación, y que permiten comprender de manera técnica y coherente los procesos asociados al desarrollo del hidrógeno verde, su cadena de valor, la infraestructura científica y tecnológica, la formación de capital humano, y los modelos de gobernanza y sostenibilidad vinculados a esta industria emergente. La selección de estos conceptos responde a la necesidad de contar con una base analítica sólida que permita alinear los instrumentos metodológicos con los objetivos del estudio, así como facilitar la identificación de brechas, capacidades y criterios de comparación entre instituciones nacionales e internacionales. A partir de este marco, se delimitan las categorías de análisis empleadas en el estudio, las cuales orientan la sistematización de la información levantada y la construcción de las recomendaciones técnicas y estratégicas contenidas en el informe.

#### 3.4.1 Cadena de Valor del Hidrógeno Verde, sus Derivados y Afines

La cadena de valor del hidrógeno verde abarca todas las etapas desde la generación de energía renovable hasta su aplicación final en diversos sectores. A continuación, se presentan las principales etapas que componen la cadena de valor del hidrógeno verde, representadas dentro de la *Figura N°3* [21]:

1. **Generación de energía renovable:** Producción de electricidad a partir de fuentes renovables como solar, eólica o hidroeléctrica, para alimentar el proceso de electrólisis.
2. **Producción de hidrógeno:** Conversión de energía eléctrica renovable en hidrógeno, principalmente utilizando tecnologías como electrolizadores alcalinos, PEM, SOEC o AEM.
3. **Conversión a derivados:** Transformación del hidrógeno en productos intermedios como amoníaco, metanol o combustibles sintéticos, lo que facilita su manejo y exportación a gran escala.
4. **Acondicionamiento y compresión:** Purificación, secado y compresión del hidrógeno producido para prepararlo para su almacenamiento o transporte.
5. **Almacenamiento:** Almacenamiento del hidrógeno en estado gaseoso o líquido en tanques a presión, tanques criogénicos o cavernas geológicas, para su uso diferido o transporte.
6. **Distribución y transporte:** Transporte del hidrógeno hacia los centros de consumo mediante ductos, camiones cisterna, ferrocarriles o conversión a derivados energéticos como amoníaco o metanol.
7. **Uso final:** Aplicación del hidrógeno o sus derivados en sectores como la industria pesada, transporte, generación eléctrica, calefacción o almacenamiento energético estacional.

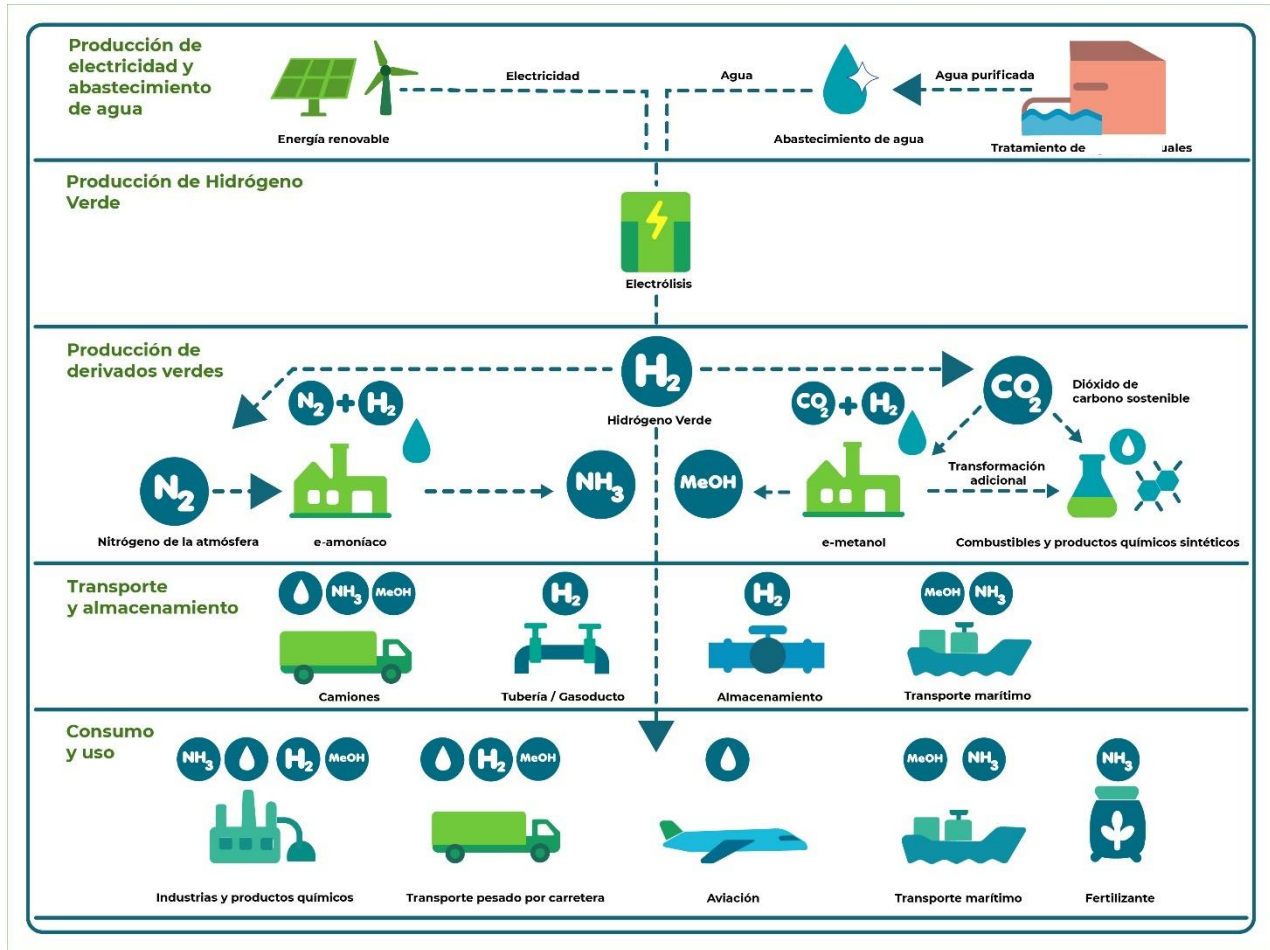


Figura N°3 Propuesta de cadena de valor del hidrógeno verde. Referencia: Green Hydrogen is Danish hydrogen [22].

### 3.4.2 Investigación y Desarrollo (I+D)

En función de las recomendaciones estipuladas en el Manual de Frascati 2015, la Investigación y el Desarrollo (I+D) “comprenden el trabajo creativo y sistemático realizado con el objetivo de aumentar el volumen de y concebir nuevas aplicaciones a partir del conocimiento disponible” [23].

Siguiendo las directrices del manual citado, para que una actividad y/o proyecto realizado por el centro sea considerado I+D, debe cumplir con cinco criterios básicos de forma simultánea, a saber [24]:

- 1) **Novedosa:** Las actividades de un proyecto de I+D deben traducirse en hallazgos que sean nuevos tanto para la unidad, así como también para el medio en que esta se desempeña. En consecuencia, se excluyen como actividades de I+D aquellas llevadas a cabo para copiar, imitar o aplicar técnicas de ingeniería inversa como medios para obtener conocimiento, por el hecho de que tal conocimiento no es considerado nuevo.
- 2) **Creativa:** Los proyectos de I+D deben tener como objetivo nuevos conceptos o ideas que desarrollen o mejoren el conocimiento existente. Se excluyen como actividades de I+D todos los cambios rutinarios a productos o procesos.

- 3) **Incierta:** Las actividades de I+D involucran incertidumbre, la cual se ve reflejada desde múltiples dimensiones. En este sentido, no es posible conocer a priori y con exactitud el resultado de un proyecto de I+D, su costo final y los beneficios que reportará en comparación a su planificación inicial. Incluso, en algunos casos pueden no lograrse, parcial o totalmente, los objetivos del proyecto.
- 4) **Sistemática:** La I+D es una actividad formal, y es ejecutada sistemáticamente. Se entenderá por sistemático el hecho de que los proyectos de I+D son llevados a cabo de forma planificada, manteniendo registros sobre el proceso seguido y sus resultados.
- 5) **Transferible y/o reproducible:** Los proyectos de I+D debiesen llevar potencialmente a la transferencia del nuevo conocimiento producido, asegurando su uso y permitiendo a otros(as) investigadores(as) reproducir sus resultados como parte de sus propias actividades de I+D. Lo anterior incluye los proyectos de I+D con resultados negativos, es decir, que no lograron cumplir con sus objetivos planteados originalmente. Dado que el propósito de la I+D es incrementar el volumen de conocimiento disponible, sus resultados no deben mantenerse como tácitos, sino que deben pasar por un proceso de codificación.

Los componentes a través de los cuales se desarrollan los proyectos I+D pueden desagregarse en los siguientes 3 tipos:

- 1) Investigación Básica
- 2) Investigación Aplicada
- 3) Desarrollo Experimental

### 3.4.3 Investigación básica

La investigación básica consiste en trabajos teóricos o experimentales llevados a cabo, principalmente, para la obtención de nuevo conocimiento, sobre las causas subyacentes de un fenómeno o de algún hecho observable, sin tener necesariamente una aplicación o uso de este conocimiento como objetivo.

### 3.4.4 Investigación aplicada

La investigación aplicada agrupa a las investigaciones originales cuyo fin es la obtención de nuevo conocimiento. A diferencia de la investigación básica, la investigación aplicada tiene una aplicación práctica u objetivo específico.

### 3.4.5 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental agrupa los trabajos sistemáticos fundamentados en los conocimientos existentes obtenidos a partir de la investigación o la experiencia práctica, que se dirigen a producir nuevos productos o procesos, o a mejorar los productos o procesos que ya existen.

### 3.4.6 Innovación

La innovación se entiende como la introducción de un producto, bien o servicio, o de un proceso que sea nuevo o esté significativamente mejorado, así como la implementación de un nuevo método de comercialización u organización, aplicado a las prácticas empresariales, a la organización del trabajo

o a las relaciones externas [25]. En este sentido consideraremos para este estudio cuatro tipos de innovaciones, a saber:

1. **Innovación de producto:** Entendida como la introducción de un bien o servicio nuevo o significativamente mejorado en sus características o en sus usos posibles. Este tipo de innovación incluye mejoras significativas en las especificaciones técnicas, los componentes o materiales, el software incorporado, la ergonomía u otras características funcionales.
2. **Innovación de proceso:** Es la introducción de un método de producción o de distribución nuevo o significativamente mejorado. Incluye mejoras significativas en técnicas, equipo o software.
3. **Innovaciones comerciales:** Entendidas como la introducción de un nuevo método de comercialización que entrañe importantes mejoras en el diseño o presentación del producto, en su posicionamiento, en su promoción o en su precio.
4. **Innovaciones organizativas:** Es la introducción de un nuevo método de organización aplicado a las prácticas de negocio, a la organización del trabajo o a las relaciones externas de la empresa. Pueden tener como objetivo mejorar los resultados de la empresa a través de la reducción de costes administrativos o de transacción, mejorar la satisfacción en el trabajo, conseguir acceso a activos no comercializables (conocimiento externo no codificado) o reducir los costes de abastecimiento.

### 3.4.7 Instituciones de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i)

Las Instituciones y/o Centros de Investigación, en función de la normativa chilena, son aquellas entidades que formen parte integrante o dependan de una universidad, o las entidades que formen parte de personas jurídicas constituidas en Chile, o las personas jurídicas constituidas en Chile; que realicen labores de investigación y desarrollo [26], y que cuenten a lo menos, con cuatro profesionales y/o técnicos que desarrollen actividades de investigación o desarrollo para el Centro de Investigación, que tengan experiencia en la realización de actividades, proyectos o labores de investigación o desarrollo o relacionadas con la investigación básica o aplicada, o labores de desarrollo tecnológico en ciencias o ingeniería, en los últimos 36 meses, y, además, estén en posesión de un título profesional o grado académico de una carrera relacionada con las ciencias o ingeniería de, a lo menos, ocho semestres de duración, otorgado por una universidad o un instituto profesional, en su caso, y en posesión de un título técnico de una carrera de las mismas características de cuatro semestres de duración otorgado por una universidad, instituto profesional o institución de formación técnica, en el caso de los técnicos [27].

Para fines del estudio se considerarán cuatro categorías de estudio referidas a instituciones y/o centros I+D+i, a saber [24]:

- 1) **Empresas:** Es aquella unidad institucional que se considera productor de bienes y servicios. El término empresa puede referirse a una sociedad, cuasi sociedad, institución sin fines de lucro o a empresas que no están constituidas como sociedades. Una empresa es un agente económico con autonomía en la toma de decisiones financieras y de inversión, así como con el poder y con autoridad y responsabilidad para asignar recursos para la producción de bienes y servicios. Puede participar en una o más actividades económicas en una o más ubicaciones. Una empresa puede constituir una única entidad jurídica.
- 2) **Instituciones de la Administración Pública:** Este sector incluye todos los ministerios, servicios y oficinas de las administraciones públicas que desarrollan una amplia gama de actividades incluyendo el desarrollo tecnológico, en términos operativos esta categoría considera a los organismos e instituciones incluidas en la Ley de presupuestos y aquellas dependientes y vinculadas.

3) **Instituciones privadas sin Fines Lucro (IPSFL):** Organizaciones sin ánimo de lucro al servicio de los hogares, excepto aquellas clasificadas dentro del sector enseñanza superior.

4) **Instituciones de Educación Superior (IES):** Son todas aquellas universidades, facultades técnicas y otras instituciones que ofertan programas oficiales de enseñanza superior, sea cual sea la fuente de financiación o personalidad jurídica.

### 3.4.8 Infraestructura y equipamiento científico y tecnológico de las instituciones y/o Centros I+D+i y de entidades de formación de personal

La investigación científico-tecnológica requiere, de espacios físicos especializados para que los investigadores y equipos puedan poner a prueba hipótesis mediante un proceso conocido como desarrollo experimental. Hay actividades orientadas al descubrimiento y la exploración (ciencias básicas); mientras que otras, necesitan de una tecnología de apoyo para demostrar su funcionalidad (ciencias aplicadas). En este sentido, este tipo de la infraestructura y equipamiento es fundamental para el desarrollo de proyectos I+D. Para el caso de los Instituciones de formación de personal, los académicos realizan principalmente dos tipos de actividades: investigación y formación de pre y posgrado. Ambas funciones requieren de un uso intensivo de los equipos de laboratorio, insumos y espacios físicos para trabajar.

A continuación, en la *Tabla N°2*, se presenta la descripción de infraestructura y equipamiento consultado en la encuesta.

*Tabla N°2 Infraestructura genérica de los centros I+D+i con proyectos de hidrógeno verde, derivados y afines. Ámbitos 9.*

Ámbito	Descripción
Laboratorios especializados	Espacios diseñados para la experimentación y análisis, equipados con tecnología avanzada según el tipo de investigación (hidrógeno, materiales, química, etc.).
Plantas piloto y bancos de prueba	Instalaciones a escala reducida para el desarrollo y validación de tecnologías antes de su implementación industrial.
Áreas de almacenamiento de materiales y sustancias	Espacios seguros para resguardar reactivos, gases y equipos sensibles, con condiciones controladas de temperatura y ventilación.
Zonas de monitoreo y control	Salas con acceso a software y hardware para supervisar en tiempo real experimentos, procesos y datos recolectados.
Salas de capacitación y entrenamiento	Espacios para formación de personal mediante simuladores, conferencias y cursos prácticos sobre tecnologías específicas.
Zona de pruebas en campo	Áreas abiertas o acondicionadas para experimentos en condiciones reales, como pruebas de impacto ambiental o validación de nuevas tecnologías.
Zonas de recreación y descanso	Área destinada para la relajación y recuperación del personal, dentro de este concepto entran áreas verdes, salas de estar, salas de descanso, entre otras.
Zona de alimentación	Área en condiciones de higiene y equipamiento destinada al consumo de alimentos por parte del personal.
Transporte interno y logística	Equipamiento de movilidad interna para el traslado de personal, equipos y muestras dentro del centro, a zona de prueba de campo o similares.

### 3.4.9 Equipamiento científico

El equipamiento científico corresponde a “laboratorios, equipamiento de pruebas de conceptos y otros relacionados a la generación de nuevo conocimiento” [28], pudiéndose distinguir el equipamiento científico principal de las plataformas que lo soportan y sus accesorios:

- **Equipo Principal:** Dispositivo que cumple, de forma autónoma o por sí solo, todas las funciones para lo cual fue diseñado o creado. El equipo debe ser capaz de obtener, generar, analizar datos o de procesar muestras, de manera independiente o conjunta.
- **Plataforma:** Conjunto de equipos especializados que trabajan de manera complementaria y/o secuencial para generar un resultado o producto, los cuales no pueden ser generados de manera independiente y completa, por uno o algunos de los equipos que integran la plataforma.
- **Accesorios:** Cualquier mecanismo, parte o dispositivo acoplable, integrable o ensamblable, ya sea en forma física o remota, al Equipo Principal o Plataforma, que tiene la capacidad de ampliar o mejorar su funcionamiento. El accesorio no debe ser un equipo autónomo.

### 3.4.10 Equipamiento tecnológico

El equipamiento tecnológico “se refiere a bancos de prueba, prototipaje, pilotaje y otros relacionados al desarrollo, pruebas y/o adaptación de tecnologías” [28], lo que implica considerar que la tecnología la vamos a entender como el conjunto de instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto, que viene a acompañar no tan sólo el equipamiento tecnológico, sino que también el equipamiento científico y técnico.

### 3.4.11 Equipamiento técnico

Para la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID), se debe considerar para el equipamiento técnico, aquellos “bancos de entrenamiento de profesional profesional-técnico, tales como operadores, mantenedores, entre otros” [28]. Teniendo en consideración la descripción proporcionada por AGCID, para este estudio, se considerará el equipamiento técnico como todo aquel equipamiento o conjunto, que tenga como finalidad principal el entrenamiento de personas en áreas técnicas, tales como mantenimiento, operación y apoyo, en torno a cualquier etapa la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados.

### 3.4.12 Personal

El desarrollo de actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) requiere de distintos perfiles profesionales y técnicos que, desde diversas funciones, contribuyen a la generación de conocimiento, a la aplicación de tecnologías y al fortalecimiento de capacidades institucionales. En este estudio, se ha considerado una clasificación que distingue a las personas involucradas en función de su rol dentro del ecosistema de I+D, permitiendo caracterizar de manera más precisa el capital humano existente y proyectar necesidades futuras de formación y fortalecimiento.

Para ello, se han definido cuatro categorías de personal relevantes para el análisis [24]:

- 1) **Personal Investigador.** Personas que se dedican a la concepción o creación de nuevos conocimientos, productos, procesos, métodos y sistemas. Son también quienes dirigen, planifican

y/o coordinan tareas de I+D, tanto como becarios/becarias en investigación y alumnos de postgrado a nivel de doctorado.

**2) Personal Técnico y Personal de Apoyo.** Personas con conocimientos técnicos y experiencia en ingeniería, física o ciencias, que apoyan directamente las actividades de investigación. Sus tareas incluyen el desarrollo de software, experimentación, análisis, recolección de datos y gestión de información técnica. En esta categoría se incluyen también los perfiles de personal operador y personal de mantenimiento de equipos científicos y tecnológicos, cuya labor especializada es clave para el funcionamiento, seguridad y continuidad de los procesos experimentales, especialmente en instalaciones vinculadas al hidrógeno verde y sus derivados.

**3) Otro Personal de Apoyo.** Personas de oficios calificados y sin calificar, de oficina y secretaría, que participa en los proyectos de I+D o está directamente asociado a tales proyectos. Este personal se identifica como aquel que presta apoyo administrativo y no está inmerso directamente en las actividades de la investigación.

**4) Personal Académico.** Es el personal con funciones de docencia y/o entrenamiento de personal, siendo un profesional o licenciado(a) vinculado a una universidad u otras que contemple la ley, que en sus labores integra la docencia, la investigación, la vinculación con el medio y/o la gestión.

## 4 Resultados del estudio en contexto nacional

Este capítulo presenta los principales resultados obtenidos a partir del levantamiento y análisis de información desarrollado durante el estudio en el contexto nacional. Los hallazgos se organizan en función de las categorías técnicas definidas en el marco conceptual y responden a los objetivos específicos establecidos. Se abordan aspectos relativos a las capacidades instaladas en las instituciones participantes, sus desafíos operacionales, el estado del equipamiento científico y tecnológico, las características de los proyectos de I+D+i y formativos, los modelos de financiamiento y gobernanza, así como las proyecciones y necesidades identificadas en relación con la cadena de valor del hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines. La información presentada combina evidencia cuantitativa y cualitativa proveniente de encuestas, entrevistas y visitas en terreno.

Se presentan las principales instituciones y centros nacionales de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), así como las instituciones de formación técnico-profesional vinculadas al hidrógeno verde y derivados, que fueron seleccionadas para este estudio, mostradas en la *Tabla N°3*. Se incluyen las seis instituciones visitadas en terreno, junto con aquellas que participaron mediante encuestas y entrevistas.

Esta información resulta clave para cumplir con los objetivos específicos 2 y 3 establecidos en las bases técnicas del estudio, orientados a identificar, sistematizar y analizar el equipamiento disponible en Chile, así como proyectar las necesidades futuras de infraestructura y formación para fortalecer la cadena de valor del hidrógeno verde.

*Tabla N°3 Catastro de instituciones que participaron de uno o más de los instrumentos utilizados en este estudio. Instituciones 27.*

Nº	Nombre o Razón Social (Anónimas)	Tipo	Categoría	Ubicación
1	<i>Institución X</i>	Empresa	I+D+i	Tiltil, Región Metropolitana
2	<i>Institución U</i>	Empresa	I+D+i	Coquimbo, Región de Coquimbo
3	<i>Institución V</i>	IPSFL	I+D+i	San Joaquín, Región Metropolitana
4	<i>Institución W</i>	IES	I+D+i	Estación Central, Región Metropolitana
5	<i>Institución Y</i>	IES	I+D+i	Viña del Mar, Región de Valparaíso
6	<i>Institución Z</i>	IPSFL	I+D+i	Vitacura, Región Metropolitana
7	<i>Institución G</i>	Empresa	I+D+i	Viña del mar, Región de Valparaíso
8	<i>Institución H</i>	Empresa	I+D+i	Las Condes, Región Metropolitana
9	<i>Institución I</i>	Empresa	I+D+i	Valparaíso, Región de Valparaíso
10	<i>Institución J</i>	Empresa	I+D+i	Lautaro, Región de la Araucanía
11	<i>Institución K</i>	IPSFL	I+D+i	Providencia, Región Metropolitana
12	<i>Institución L</i>	Empresa	I+D+i	Conchalí, Región Metropolitana
13	<i>Institución M</i>	IES	I+D+i	Macul, Región Metropolitana
14	<i>Institución N</i>	IPSFL	I+D+i	Las Condes, Región Metropolitana
15	<i>Institución O</i>	Empresa	I+D+i	Punta Arenas, Región de Magallanes
16	<i>Institución P</i>	IES	I+D+i	Santiago, Región Metropolitana

17	<i>Institución Q</i>	IES	I+D+i	Concepción, Región de Biobío
18	<i>Institución R</i>	Empresa	I+D+i	Pudahuel, Región Metropolitana
19	<i>Institución S</i>	Empresa	I+D+i	Las Condes, Región Metropolitana
20	<i>Institución T</i>	Empresa	I+D+i	Las Condes, Región Metropolitana
21	<i>Institución U</i>	Empresa	Formación	Providencia, Región Metropolitana
22	<i>Institución V</i>	IES	Formación	Punta Arenas, Región de Magallanes
23	<i>Institución W</i>	IES	Formación	Valparaíso, Región de Valparaíso
24	<i>Institución X</i>	Empresa	Formación	Osorno, Región de los Lagos
25	<i>Institución Y</i>	IES	Formación	Antofagasta, Región de Antofagasta
26	<i>Institución Z</i>	IES	Formación	Peñalolén, Región Metropolitana
27	<i>Institución XA</i>	Empresa	I+D+i	Santiago, Región Metropolitana

En la Tabla N°4, se muestran las instituciones que participaron de uno o más de los instrumentos empleados en este estudio. A continuación, se presenta una tabla en la cual se indica en qué instrumento participó cada una de las instituciones mostradas anteriormente.

*Tabla N°4 Participación de instituciones en instrumentos empleados para este estudio. Instituciones 27.*

N°	Nombre o Razón Social (Anónimas)	Visita	Encuesta	Entrevista
1	<i>Institución X</i>	●		●
2	<i>Institución U</i>	●		●
3	<i>Institución V</i>		●	
4	<i>Institución W</i>		●	
5	<i>Institución Y</i>	●	●	
6	<i>Institución Z</i>		●	
7	<i>Institución G</i>	●	●	●
8	<i>Institución H</i>		●	
9	<i>Institución I</i>		●	
10	<i>Institución J</i>		●	
11	<i>Institución K</i>		●	
12	<i>Institución L</i>		●	
13	<i>Institución M</i>		●	
14	<i>Institución N</i>			
15	<i>Institución O</i>	●		
16	<i>Institución P</i>		●	●
17	<i>Institución Q</i>		●	●

18	<i>Institución R</i>	●		●
19	<i>Institución S</i>			●
20	<i>Institución T</i>		●	●
21	<i>Institución U</i>		●	●
22	<i>Institución V</i>		●	
23	<i>Institución W</i>		●	●
24	<i>Institución X</i>		●	
25	<i>Institución Y</i>		●	
26	<i>Institución Z</i>		●	
27	<i>Institución XA</i>			●

## 4.1 Centros e instituciones nacionales relacionados con hidrógeno verde y derivados

Esta sección presenta un análisis de las instituciones nacionales que actualmente desarrollan proyectos en investigación, desarrollo e innovación, así como iniciativas de formación de capital humano en torno al hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines. Se incluyen tanto aquellas instituciones que fueron visitadas en terreno como las que participaron mediante encuestas y entrevistas. El objetivo de esta sección es caracterizar las capacidades técnicas, el equipamiento disponible, las líneas de trabajo desarrolladas y los enfoques formativos implementados, con el fin de identificar fortalezas, desafíos y oportunidades de mejora en el ecosistema nacional. Esta caracterización permite comprender el estado actual de las capacidades instaladas en el país y su grado de preparación para contribuir al desarrollo sostenible de la cadena de valor del hidrógeno verde. Es importante destacar que el desarrollo y análisis presentes en esta sección corresponde a solo las instituciones que accedieron a participar de este estudio, por lo que no se representa la totalidad de instituciones presentes en el ecosistema de I+D+i en torno al hidrógeno verde y sus derivados.

### 4.1.1 Centros e instituciones de I+D+i

Dentro de la *Tabla N°5*, se presentan las principales instituciones y centros nacionales de investigación, desarrollo e innovación relacionados con el hidrógeno verde que fueron seleccionados para este estudio. Se incluyen las instituciones visitadas, así como aquellos que participaron a través de encuestas y entrevistas. El foco del análisis está puesto en el equipamiento científico y tecnológico disponible en estos centros, en función de sus capacidades actuales para realizar actividades de I+D+i en torno al hidrógeno verde, sus derivados y afines.

La caracterización desarrollada permite conocer el estado del arte de la infraestructura tecnológica del país, así como los desafíos operacionales, logísticos y de personal asociados a su gestión. Esta información resulta clave para cumplir con los objetivos específicos 2 y 3 del estudio, establecidos en las bases técnicas, los cuales exigen identificar, sistematizar y analizar el equipamiento existente en Chile, junto con levantar las necesidades de equipamiento futuro para la cadena de valor del hidrógeno verde.

Tabla N°5 Catastro de centros de I+D+i nacionales que fueron encuestados, entrevistados y/o visitados. Instituciones 21.

N°	Nombre o Razón Social	N°	Nombre o Razón Social
1	Institución X	12	Institución L
2	Institución U	13	Institución M
3	Institución V	14	Institución N
4	Institución W	15	Institución O
5	Institución Y	16	Institución P
6	Institución Z	17	Institución Q
7	Institución G	18	Institución R
8	Institución H	19	Institución S
9	Institución I	20	Institución T
10	Institución J	21	Institución XA
11	Institución K		

Mediante los datos obtenidos a través de las encuestas se generan los resultados cuantitativos para este estudio. Las entidades que fueron encuestadas pueden identificarse mediante la *Tabla N°4*, siendo catorce (14) las entidades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) que respondieron a la totalidad de la encuesta, conformando así los resultados cuantitativos de esta sección.

A partir de la *Figura N°4*, se observa que la muestra se compone en un 42,9% por instituciones correspondientes a empresas, seguidas por instituciones de educación superior (IES) con un 35,7% y, finalmente, por instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL), que representan el 21,4% del total.

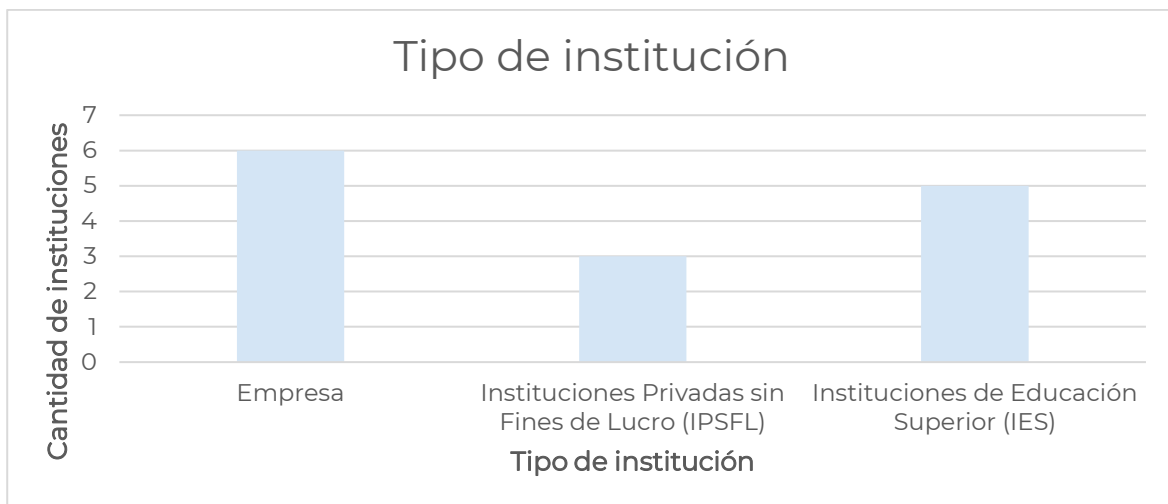
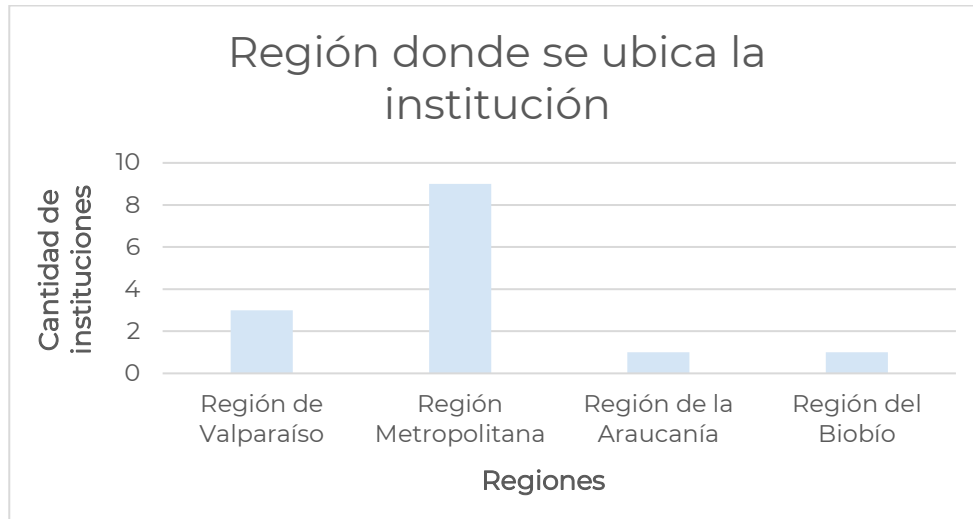


Figura N°4 Gráfico con la cantidad y tipos de institución siendo “Empresa”, “Instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL)” e “Instituciones de educación superior (IES)”. Respuestas 14/21.

Como se aprecia en la Figura N°5, la mayoría de las instituciones que participaron en las encuestas se ubican en la zona centro del país, específicamente en las regiones Metropolitana y de Valparaíso. De las 14 instituciones encuestadas, el 85,7% pertenece a esta zona, y de ese total, un 64,3% corresponde exclusivamente a la Región Metropolitana. Si se considera el total de instituciones que participaron en el estudio, incluyendo encuestas, entrevistas y visitas, se observa que un 76,0% se concentra en la Región Metropolitana o de Valparaíso.



*Figura N°5 Gráfico que muestra distribución regional de las instituciones encuestadas en cantidad de instituciones vs región de Chile. Respuestas: 14/21.*

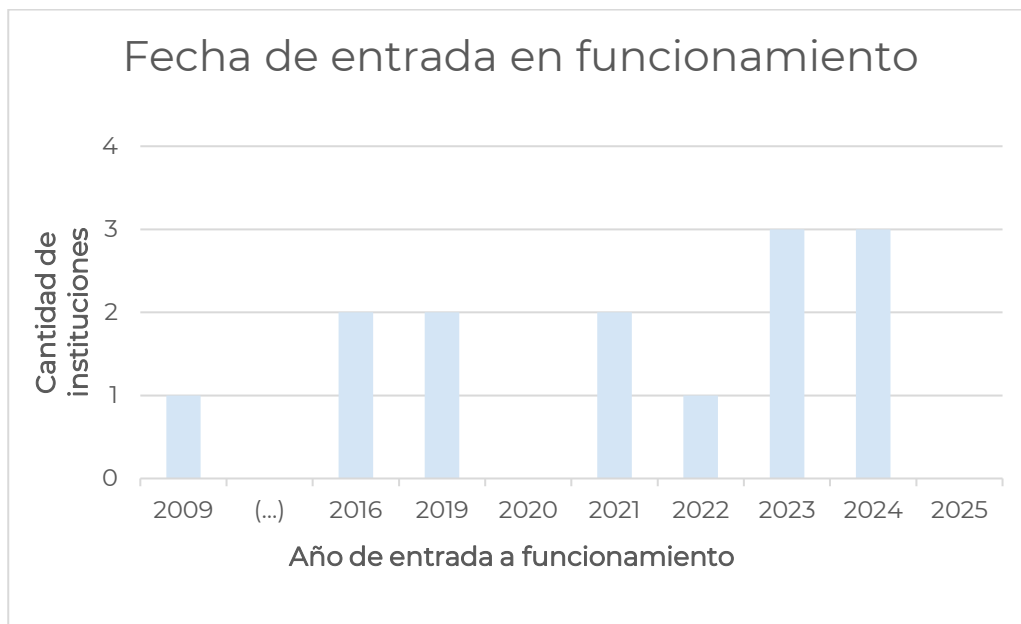
La concentración de instituciones de investigación, desarrollo e innovación en torno al hidrógeno verde en la zona centro del país, particularmente en las regiones Metropolitana y de Valparaíso, responde a múltiples factores estructurales e históricos. Esta zona ha concentrado tradicionalmente la infraestructura científica y tecnológica más robusta del país, así como la mayor densidad de universidades, centros de investigación, acceso a financiamiento público y privado, redes de colaboración y presencia institucional del Estado. Además, la centralización administrativa y económica de Chile ha favorecido que las capacidades técnicas se desarrollen mayoritariamente en esta macrozona.

Sin embargo, esta concentración tiene consecuencias significativas. En primer lugar, limita el desarrollo de capacidades regionales en zonas clave para el despliegue del hidrógeno verde, como Antofagasta y Magallanes, que cuentan con condiciones excepcionales de generación renovable. En segundo lugar, restringe las oportunidades de formación técnica, desarrollo local y empleo especializado en regiones con potencial productivo, perpetuando desequilibrios territoriales. Además, dificulta la generación de soluciones tecnológicas adaptadas a condiciones específicas de cada territorio, lo que puede afectar la eficiencia y viabilidad de los proyectos implementados fuera de la zona centro.

Para lograr un desarrollo equilibrado y sostenible del ecosistema nacional de hidrógeno verde, resulta clave avanzar en la descentralización de las capacidades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Este proceso no solo permite fortalecer la articulación entre ciencia, industria y territorio, sino también acelerar la transferencia tecnológica hacia regiones estratégicas y formar capital humano en

los territorios donde se instalarán y operarán los proyectos. Un enfoque pertinente en este contexto es el desarrollo de clústeres regionales de energía e hidrógeno verde, entendidos como agrupaciones territoriales de actores académicos, industriales y gubernamentales, que comparten infraestructura, articulan esfuerzos de formación y certificación de competencias, y desarrollan líneas de trabajo colaborativas. Un ejemplo destacable de este modelo en Chile es el Clúster de Energía de Antofagasta, el cual ha impulsado programas de formación, mecanismos de certificación de competencias laborales y acciones conjuntas con la industria energética regional. Replicar y adaptar este tipo de experiencias a otras macrozonas, con foco en el hidrógeno verde, permitiría estructurar una red distribuida de capacidades, donde la zona centro actúe como nodo articulador nacional, pero con polos especializados en las regiones claves para el desarrollo del I+D+i en Chile.

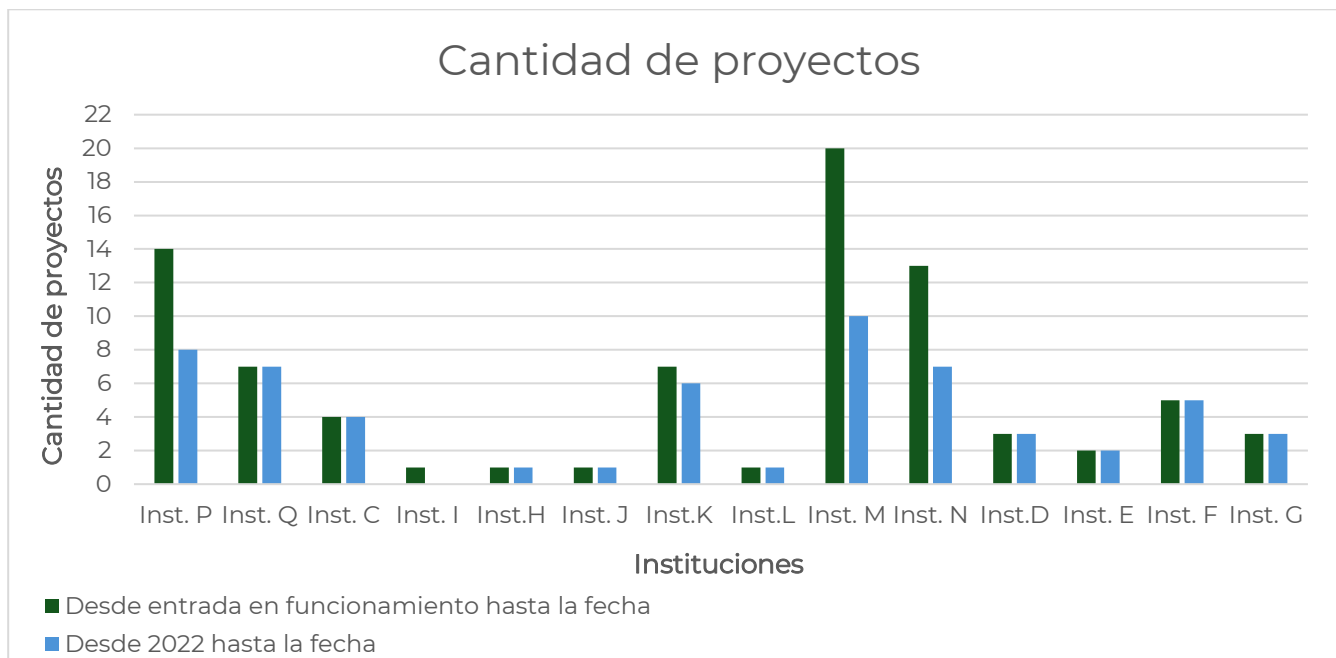
La *Figura N°6*, muestra que la mayoría de los centros vinculados al hidrógeno verde han comenzado a operar en los últimos años, destacando los años 2023 y 2024 con la mayor cantidad de aperturas. Esta tendencia evidencia un impulso reciente en la instalación de capacidades científicas y tecnológicas asociadas al hidrógeno, alineado con el fortalecimiento de políticas públicas y el creciente interés del sector. La baja presencia de centros previos a 2016 sugiere que se trata de un ecosistema aún en consolidación. En este contexto, surge como aspecto relevante complementar la expansión de infraestructura con la consolidación de un sistema de formación y certificación de competencias laborales. Si bien el presente estudio se enfoca principalmente en infraestructura y equipamiento, se identificaron experiencias incipientes de articulación con iniciativas de certificación. Avanzar en el levantamiento sistemático de información sobre centros certificadores, capacidades de formación técnica y mecanismos de reconocimiento de aprendizajes resulta clave para asegurar que el capital humano requerido por esta industria emergente cuente con las competencias validadas y pertinentes, considerando además que ChileValora ha publicado durante el año 2025 3 perfiles laborales específicos para la cadena de valor del hidrógeno verde, considerando personal supervisor, mantenedor y operador, los cuales describen tanto los conocimientos requeridos por estos perfiles, como las tareas con las que debe cumplir este perfil [29].



*Figura N°6 Año de entrada en funcionamiento de las instituciones encuestadas. Respuestas 14/21.*

La tendencia observada en la Figura N°6, que muestra un aumento significativo de instituciones creadas en 2023 y 2024, se vincula directamente con el impulso dado por el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030 y el creciente interés nacional por posicionar a Chile como actor relevante en esta industria emergente [7]. Este patrón refleja un ecosistema en formación, donde la instalación de nuevas capacidades responde tanto a políticas públicas recientes como a la demanda por innovación tecnológica y capital humano especializado. La baja presencia de centros anteriores a 2016 confirma que se trata de un campo en desarrollo, cuya consolidación requerirá sostenibilidad institucional, inversión en infraestructura y una mayor distribución territorial.

Por su parte, en la *Figura N°7*, se aprecia una distribución desigual del número de proyectos ejecutados y en ejecución, tanto a lo largo del tiempo como en los periodos recientes. Se distingue la presencia de actores con una trayectoria consolidada y una actividad sostenida, contrastando con otros que registran una participación más limitada. Esta concentración en pocos participantes indica la existencia de polos de alta actividad, pero también revela un potencial significativo para la diversificación y descentralización de los esfuerzos a nivel nacional. El aumento de proyectos en curso durante 2024 confirma, no obstante, la vitalidad y el crecimiento del ecosistema, impulsado por la convergencia entre inversión pública, colaboración interinstitucional y demanda tecnológica emergente.



*Figura N°7 Cantidad de proyectos en ejecución o ejecutados por cada una de las instituciones encuestadas, aplicado para periodos desde la entrada en funcionamiento hasta la fecha y desde 2022 hasta la fecha. Respuestas 14/21.*

La *Figura N°8*, presenta la distribución total de personas que participan en actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) dentro del conjunto de entidades analizadas. Los resultados evidencian diferencias significativas en la magnitud de los equipos, con algunas organizaciones que concentran una dotación superior a 25 personas, reflejando una capacidad

instalada considerable y una orientación más intensiva hacia la innovación tecnológica y el desarrollo aplicado. Este tipo de entidades tiende a operar bajo modelos de gestión más flexibles y con mayor autonomía financiera, lo que favorece la dedicación exclusiva a proyectos vinculados a nuevas tecnologías y procesos experimentales.

En el extremo opuesto, se identifican organizaciones con menos de 10 personas dedicadas a I+D+i, lo que podría estar asociado a estructuras más acotadas, enfoques especializados en áreas específicas o etapas iniciales de desarrollo institucional.

Por otro lado, un grupo intermedio compuesto principalmente por entidades académicas muestra dotaciones que superan las 10 personas, lo que confirma su papel activo en la generación de conocimiento, la experimentación tecnológica y la formación de capital humano especializado. En conjunto, los resultados reflejan un ecosistema heterogéneo, donde coexisten actores consolidados con alta capacidad operativa y otros en fase de crecimiento o especialización, conformando una base diversa que contribuye al fortalecimiento progresivo de las capacidades nacionales en hidrógeno verde.



*Figura N°8 Cantidad de personas que realizan actividades de investigación, desarrollo y/o innovación. Respuestas 14/21.*

En síntesis, la distribución del personal dedicado a actividades de I+D+i en las instituciones encuestadas refleja un ecosistema en expansión, pero aún heterogéneo en términos de capacidades humanas. Mientras algunas entidades, particularmente del sector privado y del ámbito académico, exhiben dotaciones consolidadas que permiten abordar proyectos de mayor envergadura y complejidad tecnológica, otras operan con estructuras reducidas que podrían limitar su capacidad de ejecución, experimentación y escalabilidad, una segunda lectura que se puede dar se relaciona con las actividades de entidades privadas que permiten al personal realizar actividades de I+D+i de tiempo completo, mientras que en instituciones de formación el I+D+i por lo general debe complementarse con otros tipos de actividades. Esta disparidad refuerza la importancia de fortalecer de forma estratégica el capital humano especializado, no solo aumentando su número, sino también diversificando perfiles, promoviendo formación técnica y profesional, e incentivando la permanencia

de equipos multidisciplinarios en instituciones clave para el desarrollo del hidrógeno verde en Chile. Esta necesidad ha sido reconocida como una condición habilitante en el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030, el cual establece como prioridad la generación de capacidades humanas para impulsar el desarrollo sostenible y competitivo de esta industria [7].

#### 4.1.2 Instituciones de formación de personal

Esta sección presenta las instituciones nacionales identificadas como dedicadas principalmente a la formación técnico-profesional en temáticas vinculadas al hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines, estas se muestran dentro de la *Tabla N°6*. Se incluyen las seis instituciones que participaron en el estudio mediante encuestas y entrevistas. Si bien el número de casos no permite representar la totalidad del ecosistema formativo nacional, estas instituciones fueron seleccionadas por su vinculación directa con procesos de formación de capital humano y por no estar orientadas exclusivamente a actividades de investigación y desarrollo.

El análisis se enfoca en el equipamiento científico, tecnológico y didáctico disponible para apoyar procesos de enseñanza/aprendizaje en distintos niveles de formación. Asimismo, se consideran aspectos operacionales, pedagógicos y logísticos que afectan la implementación de programas vinculados a la cadena de valor del hidrógeno verde. Esta caracterización contribuye al cumplimiento de los objetivos específicos 2 y 3 del estudio, establecidos en las bases técnicas, que contemplan la identificación, sistematización y análisis del equipamiento existente en Chile, junto con el levantamiento de necesidades futuras para el fortalecimiento de capacidades humanas en el sector.

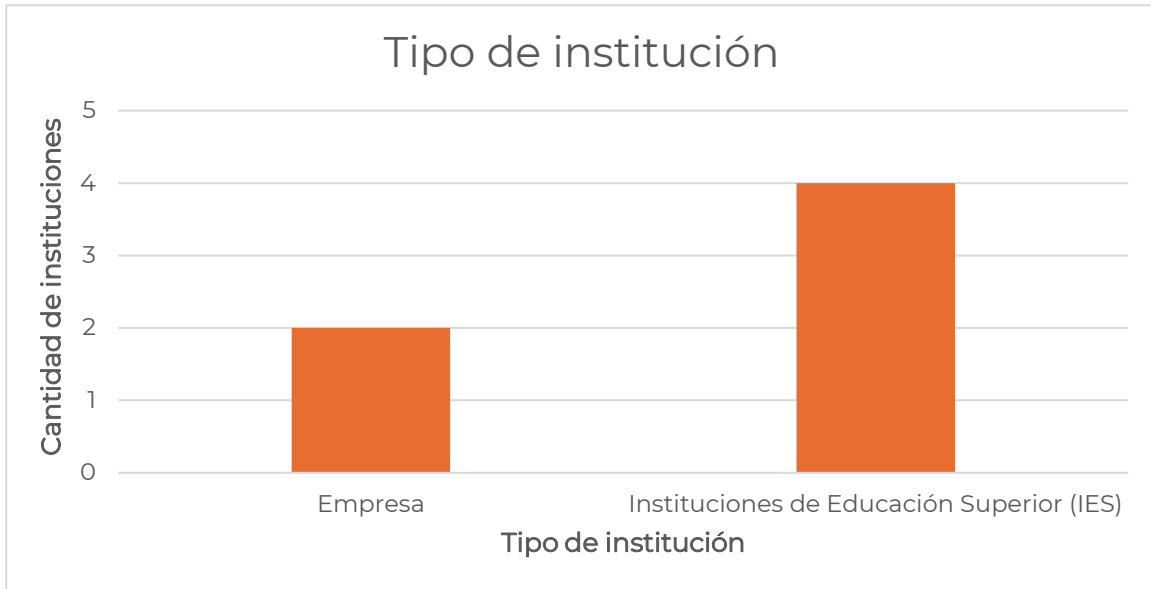
*Tabla N°6 Catastro de instituciones de formación de capital humano que fueron encuestadas, entrevistadas y/o visitadas. Instituciones 6.*

N°	Nombre o Razón Social (Anónimas)
1	Institución U
2	Institución V
3	Institución W
4	Institución X
5	Institución Y
6	Institución Z

Mediante los datos obtenidos por medio de las encuestas se generan los resultados cuantitativos para este estudio. La totalidad de instituciones mostradas en este apartado fueron encuestadas. En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos de las encuestas realizadas, buscando catastrar y principalmente caracterizar estas instituciones de entrenamiento y formación de capital humano en torno al hidrógeno verde y derivados.

En la *Figura N°9*, se puede apreciar que la distribución en los tipos de institución son instituciones de educación superior (IES) y también empresas. Se observa que la mayoría de las instituciones encuestadas corresponden a instituciones de educación superior (IES), las cuales representan dos tercios del total de respuestas. También, sugiere limitaciones importantes en la vinculación directa con la industria y en el desarrollo de competencias prácticas en contextos operativos reales. Además,

se identifica una brecha significativa en etapas formativas tempranas, como liceos técnicos, centros de formación técnica (CFT) e institutos profesionales (IP), donde aún no existen programas específicos que aborden de manera sistemática las necesidades del ecosistema de hidrógeno verde. Esta situación plantea un desafío relevante para la articulación del sistema formativo con los requerimientos emergentes del sector.



*Figura N°9 Gráfico con la cantidad y tipos de institución siendo “Empresa”, Instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL)” e “Instituciones de educación superior (IES)”. “Respuestas 6/21.*

En cuanto a la distribución territorial de las instituciones dedicadas a la formación de personal en hidrógeno verde y sus derivados, los datos de la *Figura N°10*, muestran una presencia institucional relativamente equilibrada en distintas regiones del país, considerando la muestra disponible de 6 instituciones. Si bien la Región Metropolitana concentra una institución más en comparación con las demás, se aprecia que existen programas de capacitación y entrenamiento activos en zonas diversas del territorio nacional. Incluye regiones estratégicas para Chile como Antofagasta, Valparaíso, Metropolitana, Biobío y Magallanes, reconocidas por su potencial en el despliegue futuro de proyectos vinculados al hidrógeno verde.

La presencia de estas instituciones en regiones clave refleja una articulación incipiente entre distintas capas del ecosistema, incluyendo la industria, la investigación aplicada, la educación técnico-profesional y la innovación. Fortalecer y expandir estos programas en regiones con alto potencial será fundamental para garantizar que el crecimiento de la industria del hidrógeno verde sea sostenible, inclusivo y alineado con las oportunidades productivas y tecnológicas del país.

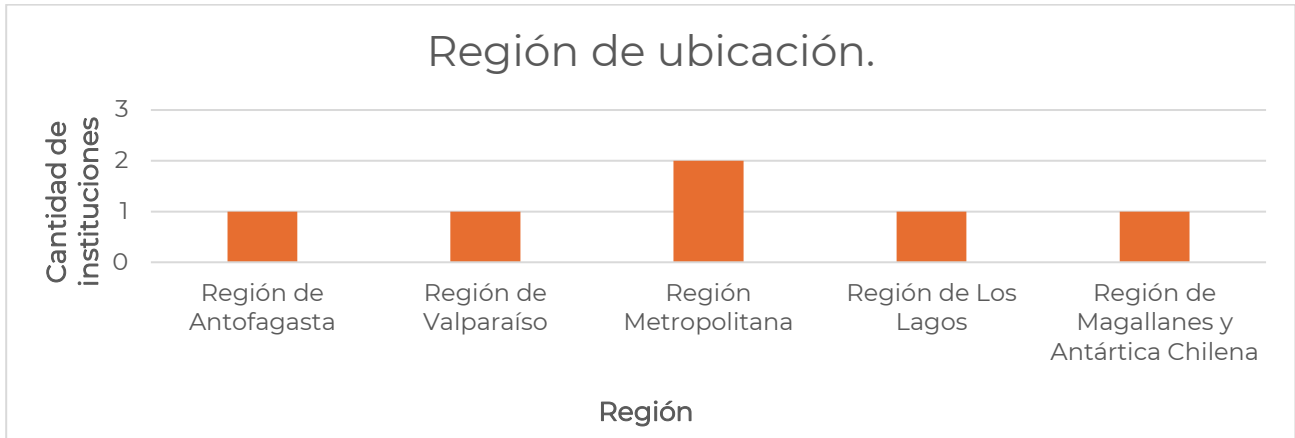


Figura N°10 Gráfico que muestra distribución regional de las instituciones encuestadas en cantidad de instituciones vs región de Chile. Respuestas: 6/21.

La Figura N°11, muestra la distribución temporal de la entrada en funcionamiento de los programas formativos específicamente asociados al hidrógeno verde y sus derivados, ofrecidos por las instituciones encuestadas. Se observa que la mayoría de estos programas fueron implementados entre los años 2019 y 2024, con puntos de mayor concentración en 2019 y 2023.

Este comportamiento evidencia que la incorporación del hidrógeno como contenido formativo es un fenómeno reciente, reflejo del aumento del interés nacional por desarrollar capacidades técnicas alineadas con el avance de la industria del hidrógeno verde. La aparición progresiva de estos programas en los últimos cinco años indica una reacción de las instituciones frente a la demanda emergente por capital humano calificado, tanto desde el sector público como desde la industria energética.

La inexistencia de programas anteriores a 2019 confirma que esta área temática ha sido incorporada recientemente en la oferta educativa nacional, considerando además que durante el año 2020 y 2021 sucedió la pandemia del COVID-19. No obstante, la continuidad en su apertura demuestra un compromiso creciente con el desarrollo de competencias especializadas, necesarias para acompañar el despliegue tecnológico y productivo de esta industria estratégica.

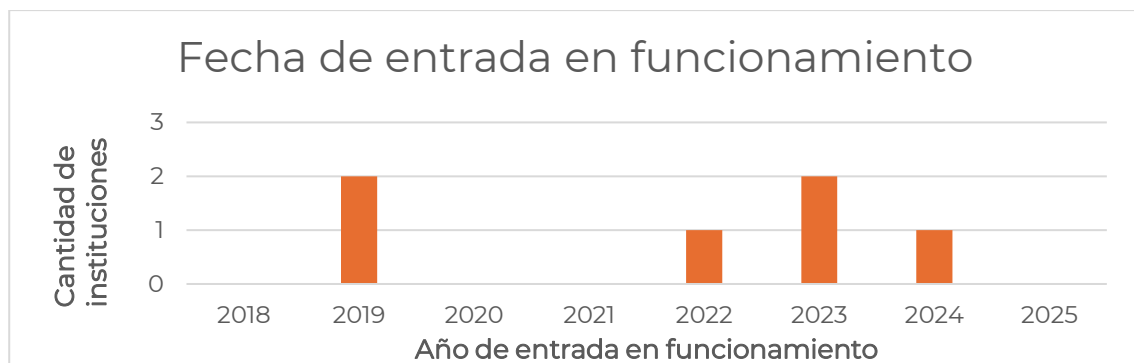
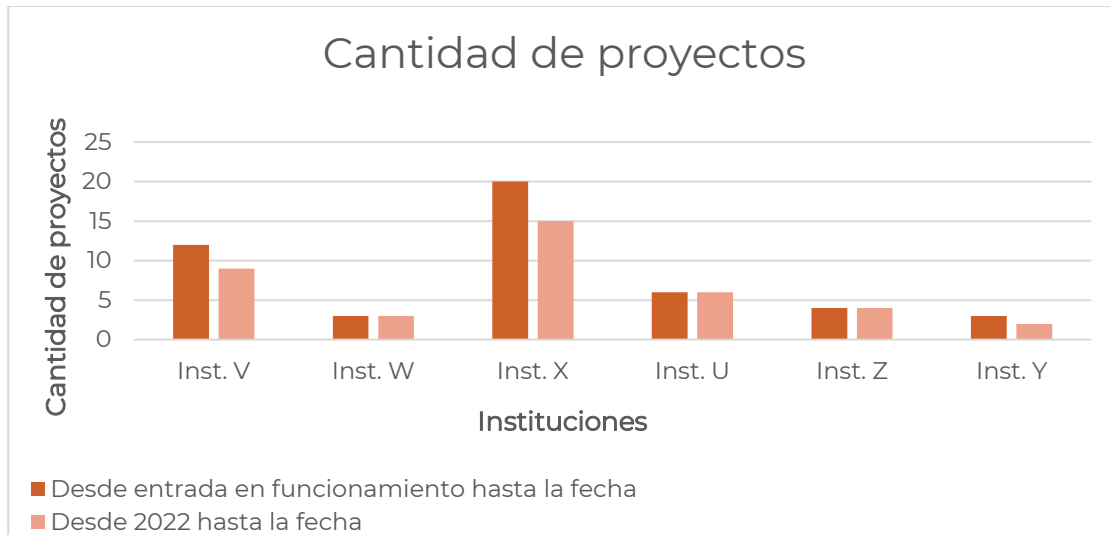


Figura N°11 Año de entrada en funcionamiento de las instituciones encuestadas. Respuestas 6/21.

La Figura N°12, se muestra la cantidad de proyectos en ejecución o ejecutados por cada una de las instituciones encuestadas, considerando dos períodos: desde la entrada en funcionamiento del programa formativo hasta la fecha, y desde el año 2022 en adelante. Este análisis permite observar no solo el volumen total de actividad por institución, sino también el comportamiento reciente del desarrollo de proyectos en el área del hidrógeno verde y sus derivados.

En conjunto, los resultados reflejan que, si bien existe heterogeneidad en el nivel de actividad, varias instituciones han logrado consolidar una cartera de proyectos significativa, especialmente a partir de 2022, lo que confirma el dinamismo creciente del sector formativo y su vinculación con el desarrollo aplicado del hidrógeno verde en Chile. A pesar de contar con una menor cantidad de proyectos, fortalecer a aquellas instituciones con presencia incipiente resulta clave para construir un ecosistema de formación más equilibrado, descentralizado y con mayores capacidades de respuesta a los requerimientos de una industria en expansión. Estas instituciones, generalmente enfocadas en la formación técnica y profesional mediante programas ya establecidos, poseen un alto potencial para aportar a la especialización del capital humano. Sin embargo, también pueden enfrentar restricciones en cuanto a su vinculación con la industria o en la provisión de experiencias prácticas en entornos operativos reales. En este sentido, resulta fundamental no solo reconocer a los actores activos y sus capacidades instaladas, sino también comprender el nivel de articulación que mantienen con el sector productivo y las redes de colaboración interinstitucional. Esta caracterización permitirá focalizar esfuerzos de fortalecimiento institucional y posicionarlas como aliados estratégicos en la consolidación de un ecosistema nacional robusto y coordinado.

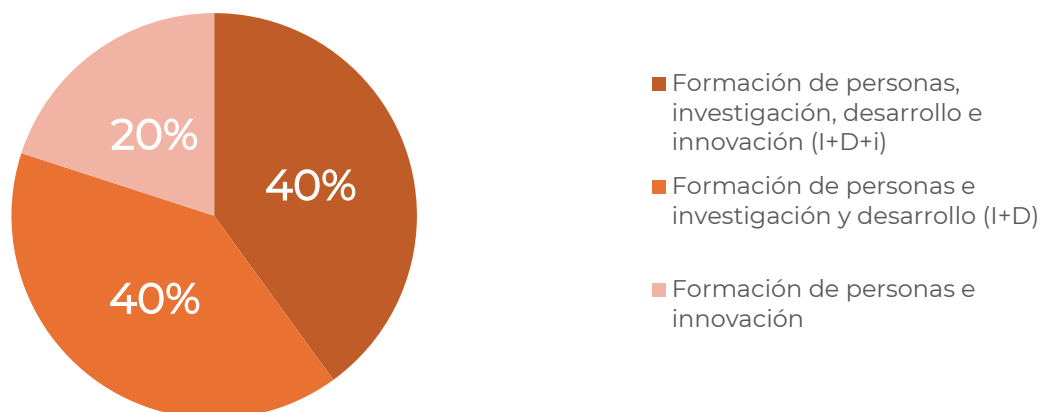


*Figura N°12 Cantidad de proyectos en ejecución o ejecutados por cada una de las instituciones encuestadas, aplicado para periodos desde la entrada en funcionamiento hasta la fecha y desde 2022 hasta la fecha. Respuestas 6/21.*

Dentro de la *Figura N°13*, se muestra de la distribución de actividades desarrolladas por las instituciones formativas encuestadas en relación con el hidrógeno verde y sus derivados, más allá de sus funciones tradicionales de formación de capital humano. Se observa que un 40% de las

instituciones declara realizar actividades integradas de formación, investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), mientras que otro 40% combina formación con actividades de investigación y desarrollo (I+D). El 20% restante se dedica a formación y actividades de innovación tecnológica.

## Tipo de actividades de las instituciones formativas



*Figura N°13 Distribución de actividades según instituciones en materia de I+D+i además de sus actividades de formación. Respuestas 6/21.*

Estos resultados evidencian que la totalidad de las instituciones encuestadas se encuentran activamente involucradas en alguna dimensión del desarrollo tecnológico, lo cual refuerza su rol como actores relevantes en el ecosistema de hidrógeno verde. Además, se destaca que ninguna de las instituciones realiza exclusivamente formación de personal, lo que indica un enfoque integral que combina enseñanza con generación de conocimiento y aplicación práctica.

Esta vinculación entre formación e I+D+i es clave para asegurar que los programas impartidos respondan efectivamente a los desafíos tecnológicos y productivos que plantea esta industria. Asimismo, permite generar entornos de aprendizaje más contextualizados, formar personal técnico con experiencia en proyectos reales y fortalecer la capacidad de transferencia tecnológica hacia el sector industrial. En este sentido, promover la continuidad y el fortalecimiento de estas funciones integradas resulta fundamental para el desarrollo sostenible y competitivo del hidrógeno verde en Chile.

## 4.2 Proyectos relacionados con hidrógeno verde y derivados

En esta sección se reúnen los proyectos identificados en instituciones nacionales vinculados al hidrógeno verde y sus derivados. Se consideran tanto iniciativas orientadas a la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), como proyectos formativos y de transferencia tecnológica, abarcando diversas etapas de la cadena de valor. El objetivo es caracterizar las principales líneas de trabajo, enfoques institucionales, niveles de madurez tecnológica, propósitos estratégicos, fuentes de

financiamiento y actores involucrados. Este análisis permite identificar tendencias, buenas prácticas y brechas comunes, aportando una visión integral sobre el estado actual del desarrollo de proyectos relacionados con el hidrógeno verde y sus aplicaciones en contextos productivos, formativos y territoriales.

#### 4.2.1 Caracterización de los proyectos I+D+i

Se presenta la caracterización de los proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) identificados en las instituciones nacionales participantes del estudio, en el marco del desarrollo del hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines. El análisis considera variables clave como el enfoque temático de los proyectos, los objetivos estratégicos que persiguen, los componentes que los estructuran y los sectores de aplicación. Asimismo, se revisan aspectos relacionados con su financiamiento, formas de ejecución y grado de vinculación con actores externos. Esta caracterización permite comprender la orientación actual de las iniciativas de I+D+i en el país y su contribución al fortalecimiento de capacidades técnicas y tecnológicas en torno a la cadena de valor del hidrógeno verde.

La *Figura N°14*, se muestra el enfoque temático de los proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) declarados por las instituciones encuestadas, en relación con las distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados. Se observa una fuerte concentración de iniciativas en la etapa de uso, seguida por la producción y la generación de insumos o fuentes de energía. Estas tres categorías agrupan la mayor parte de los proyectos, lo que sugiere que el ecosistema nacional de I+D+i está actualmente orientado hacia aplicaciones finales y procesos de generación de hidrógeno a partir de energías renovables.

En contraste, las etapas intermedias de la cadena de valor, como el acondicionamiento, el almacenamiento, la reconversión en derivados y el transporte y distribución, presentan una participación significativamente menor. Este desbalance evidencia una brecha tecnológica en fases críticas para la escalabilidad industrial del hidrógeno verde, ya que el acondicionamiento y la logística son esenciales para garantizar su viabilidad como vector energético a gran escala. La baja representación en reconversión también indica que la producción de derivados como amoníaco, metanol o e-fuels aún no se ha integrado de forma sustantiva en la agenda de investigación nacional, salvo contadas excepciones.

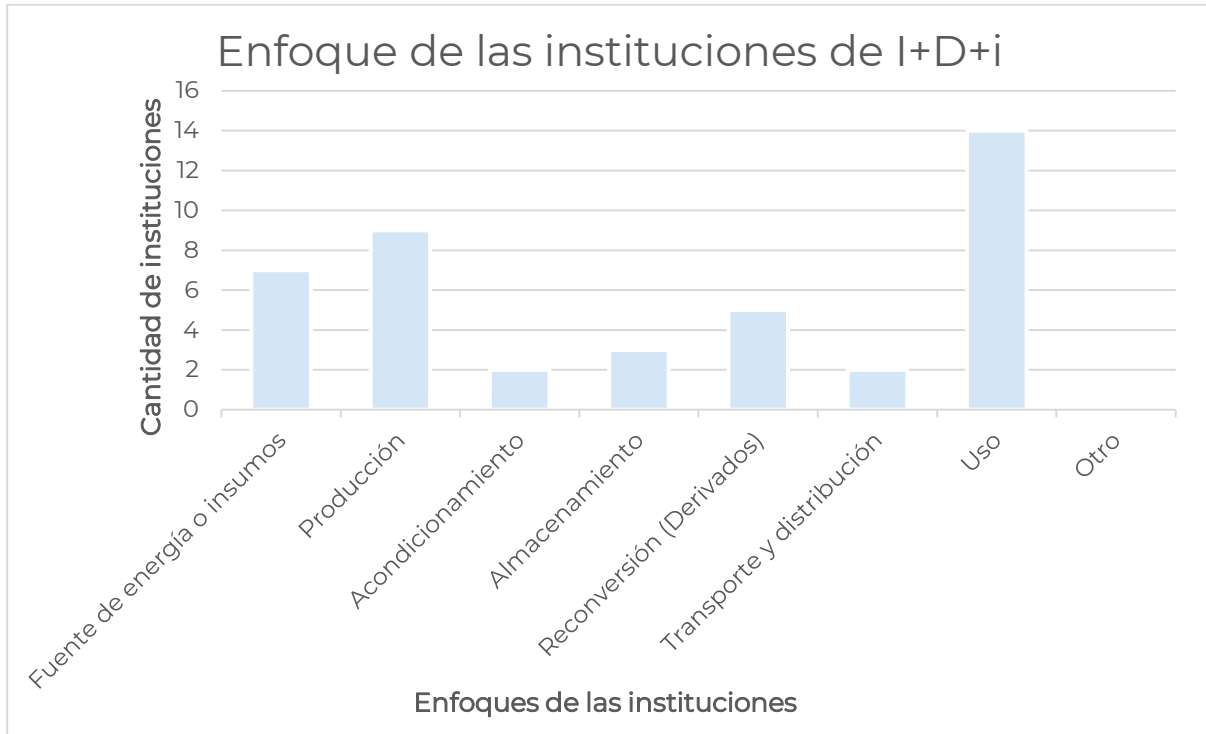
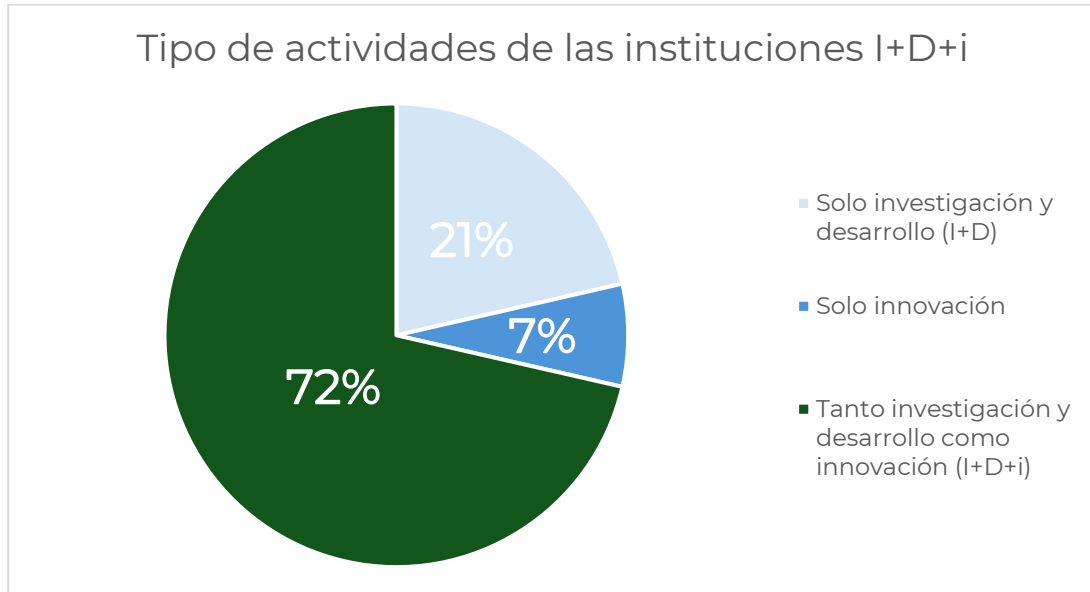


Figura N°14 Gráfico que muestra el enfoque de las instituciones centradas en I+D+i sobre la cadena de valor del hidrógeno verde y derivados propuesta. Respuestas 14/21.

Es relevante destacar que ninguna institución seleccionó la opción “otro”, lo que sugiere que las categorías definidas en la encuesta representan adecuadamente los eslabones considerados más relevantes desde la perspectiva de los actores participantes. Esto otorga consistencia al instrumento metodológico utilizado y refuerza la validez de las conclusiones extraídas a partir de estos datos.

La *Figura N°15*, se muestra la distribución del tipo de actividades realizadas por las instituciones de I+D+i encuestadas, distinguiendo entre aquellas que se dedican exclusivamente a investigación y desarrollo (I+D), a innovación, o a ambas de manera integrada. El resultado más significativo es que un 72% de las instituciones declara desarrollar tanto actividades de I+D como de innovación, lo que refleja una orientación mayoritaria hacia enfoques integrales en el desarrollo tecnológico del hidrógeno verde.

Esta tendencia es coherente con los requerimientos actuales del ecosistema, donde ya no basta con generar conocimiento científico, sino que se vuelve fundamental articularlo con procesos de validación experimental, escalamiento técnico y aplicación práctica en contextos reales. La combinación de investigación con innovación permite a estas instituciones no solo contribuir a la frontera del conocimiento, sino también ofrecer soluciones concretas a los desafíos productivos y ambientales que enfrenta la industria del hidrógeno verde en Chile.



*Figura N°15 Gráfico que representa el tipo de actividades que realizan las instituciones, siendo: sólo investigación y desarrollo (I+D), sólo innovación o actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Respuestas 14/21.*

El hecho de que solo el 21% de las instituciones se concentre exclusivamente en investigación y un 7% en innovación, sugiere que el sistema ha evolucionado hacia modelos más colaborativos e interdisciplinarios, con una fuerte orientación a resultados aplicables. Esto fortalece las condiciones para la transferencia tecnológica, el diseño de prototipos y la formación de alianzas con el sector productivo, contribuyendo así a cerrar brechas en las distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno. En consecuencia, estas capacidades instaladas no solo deben ser preservadas, sino también potenciadas como eje estructurante de una estrategia nacional de desarrollo en hidrógeno verde.

Este enfoque integral que combina investigación, desarrollo e innovación, abordado en la sección anterior, se manifiesta también en la diversidad de categorías de innovación que las instituciones encuestadas declaran en sus proyectos. La *Figura N°16*, da cuenta de esta amplitud, al mostrar que la mayoría de las instituciones no se limita a un único tipo de innovación, sino que participa en varias categorías simultáneamente, reflejando una madurez creciente en sus estrategias de desarrollo tecnológico.

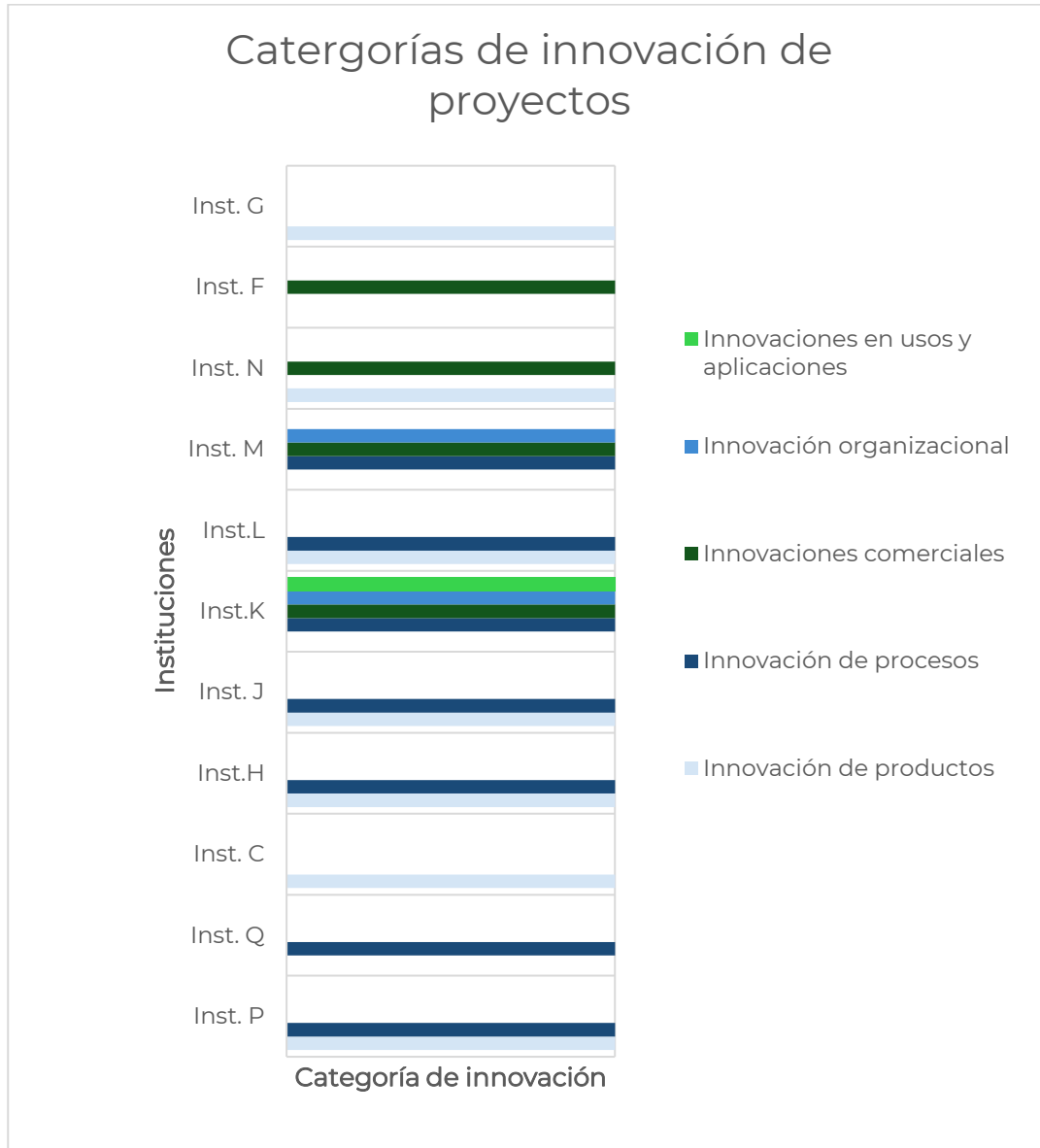


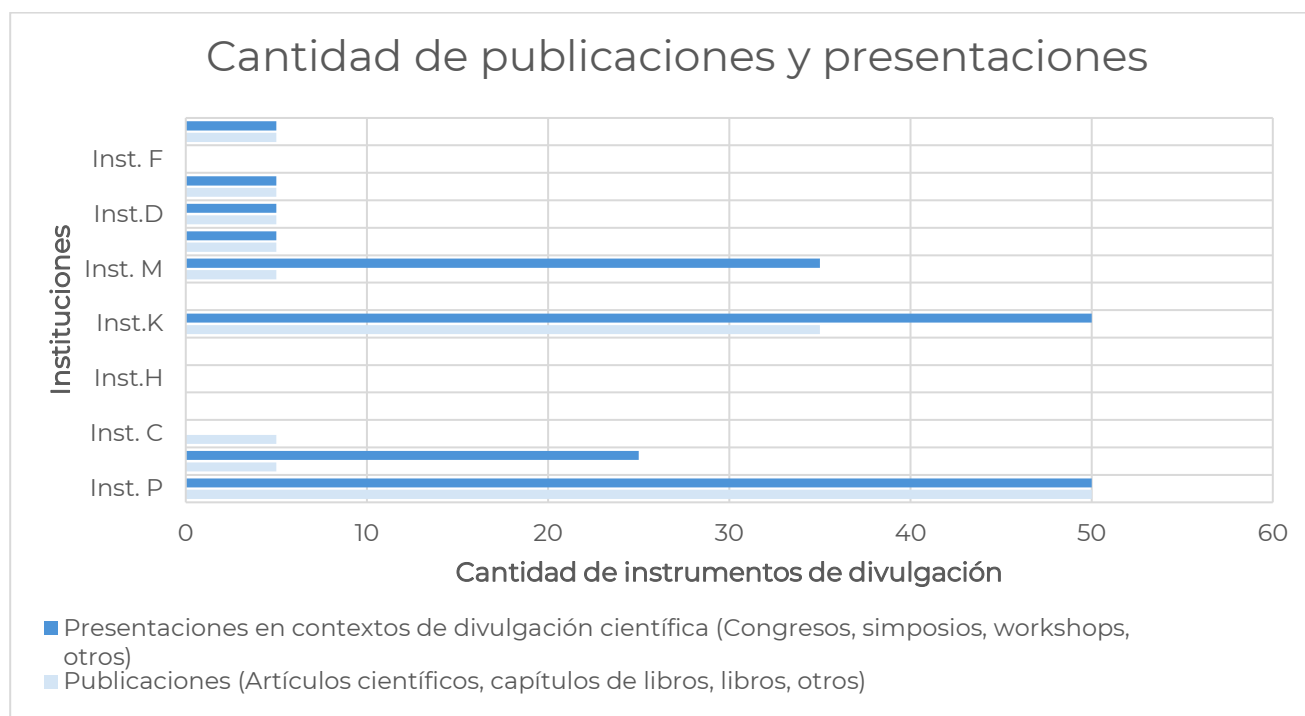
Figura N°16 Gráfico con los tipos de innovaciones realizadas por las instituciones, clasificadas en distintas categorías. Respuestas 11/21; tres instituciones no tienen actividades de innovación.

Se observa una alta presencia de innovaciones en productos, procesos y usos y aplicaciones, lo que sugiere que muchas instituciones están orientadas tanto al diseño de nuevas soluciones como a la mejora de tecnologías existentes y su adaptación a contextos específicos. La innovación organizacional y comercial, si bien menos frecuente, también está presente, indicando esfuerzos por adaptar modelos de gestión, posicionamiento y vinculación con el mercado, aspectos clave para el escalamiento tecnológico.

Por otra parte, tres instituciones no reportaron actividades de innovación, lo que podría estar relacionado con un menor nivel de madurez institucional o una especialización centrada exclusivamente en la investigación. Estos casos refuerzan la necesidad de fortalecer el vínculo entre

I+D y los procesos de innovación aplicada, especialmente si se busca impulsar soluciones tecnológicas que respondan a los desafíos reales de la industria del hidrógeno verde en el país. En este sentido, la innovación debe entenderse no como un resultado aislado, sino como un componente estructural de los proyectos de desarrollo tecnológico.

La capacidad de generar innovación en múltiples dimensiones, como se observó en la *Figura N°16*, encuentra su correlato en los mecanismos de divulgación científica y técnica que las instituciones implementan para compartir sus resultados. La *Figura N°17*, refuerza este punto al mostrar la cantidad de publicaciones y presentaciones realizadas por cada institución en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados.



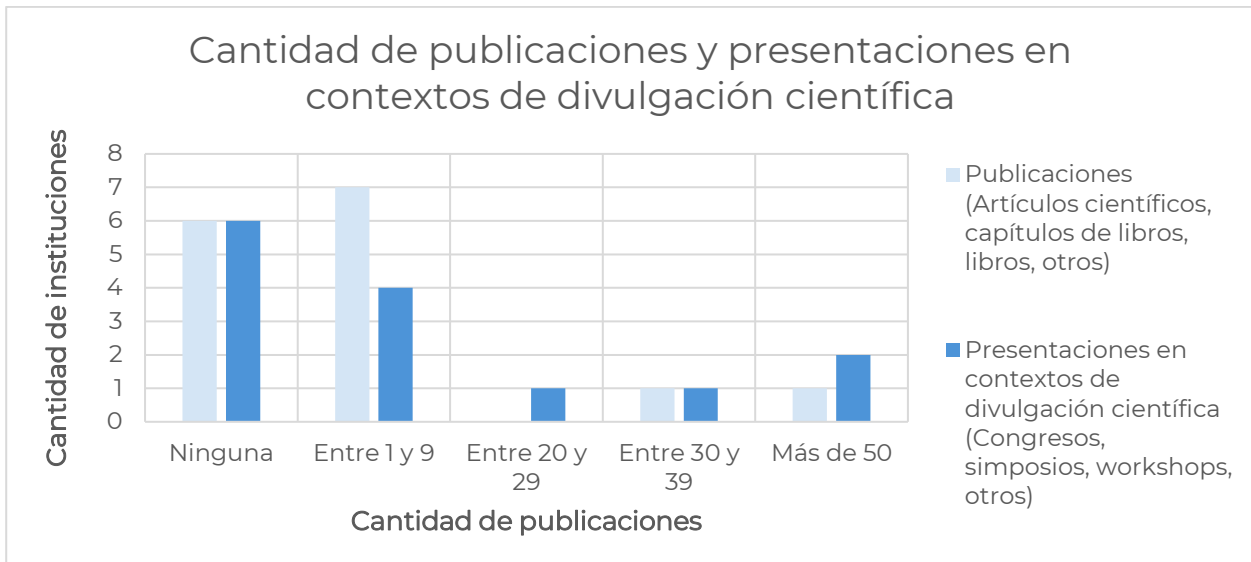
*Figura N°17 Gráfico de cantidad de publicaciones y presentaciones realizadas por cada institución, en base a resultados obtenidos en temas relacionados al hidrógeno verde hasta la fecha. Respuestas 14/21; cinco instituciones no han realizado divulgación de sus resultados.*

En el gráfico se evidencia que la mayoría de las instituciones ha desarrollado al menos algún tipo de actividad de divulgación, siendo más frecuentes las presentaciones en congresos, simposios o workshops que las publicaciones formales en artículos científicos, libros o capítulos. Un grupo reducido destaca por su producción equilibrada en ambas categorías, mostrando un alto nivel de compromiso con la difusión del conocimiento y una participación activa en la generación y transferencia de resultados. Este comportamiento refuerza su posicionamiento dentro del ecosistema nacional de investigación, desarrollo e innovación, aportando a la consolidación de una cultura científica abierta y colaborativa.

En contraste, cinco instituciones no reportaron ninguna actividad de divulgación, lo que puede estar vinculado a factores como menor madurez institucional, falta de estrategias de comunicación

científica, proyectos aún en etapa inicial o, en algunos casos, a enfoques de I+D+i orientados exclusivamente al beneficio interno de la propia institución, sin un propósito explícito de generar conocimiento abierto para la comunidad científica o el ecosistema nacional. Esta brecha plantea un desafío para el fortalecimiento del ecosistema, ya que la visibilidad de los resultados es clave para fomentar la colaboración, la transferencia tecnológica y la construcción de redes de conocimiento.

La *Figura N°18*, permite profundizar en los patrones de divulgación científica observados previamente, mostrando la distribución de las instituciones según la cantidad total de publicaciones y presentaciones realizadas. Se destaca que la mayoría de las instituciones se concentra en rangos bajos de actividad, específicamente entre 1 y 9 publicaciones o presentaciones. Sólo una institución reporta más de 50, reflejando un liderazgo sostenido en la difusión de conocimiento técnico y científico en hidrógeno verde. Por otro lado, cinco instituciones no han realizado divulgación alguna, lo que representa más de un tercio del total de casos analizados.



*Figura N°18 Cantidad de instituciones que presentan cierta cantidad de publicaciones y presentaciones en base a resultados obtenidos en temas relacionados al hidrógeno verde hasta la fecha. Respuestas 14/21; cinco instituciones no han realizado divulgación de sus resultados.*

Este panorama confirma que, si bien existen esfuerzos significativos por compartir avances en espacios científicos y técnicos, la producción y visibilidad de resultados sigue siendo limitada y desigual. Este patrón también puede vincularse a la orientación estratégica de cada institución, al tipo de proyectos ejecutados y al grado de consolidación de sus capacidades en I+D+i.

La disparidad en la actividad de divulgación evidencia la necesidad de promover prácticas institucionales que fortalezcan la comunicación científica como parte integral del ciclo de desarrollo tecnológico. Establecer incentivos para publicar resultados, participar en eventos académicos o vincularse con redes nacionales e internacionales podría ser clave para consolidar un ecosistema más transparente, colaborativo y con mayor capacidad de transferencia.

Este análisis resulta particularmente relevante al momento de examinar las características internas de los proyectos de I+D+i ejecutados por las instituciones, incluyendo sus objetivos estratégicos, componentes técnicos y mecanismos de vinculación.

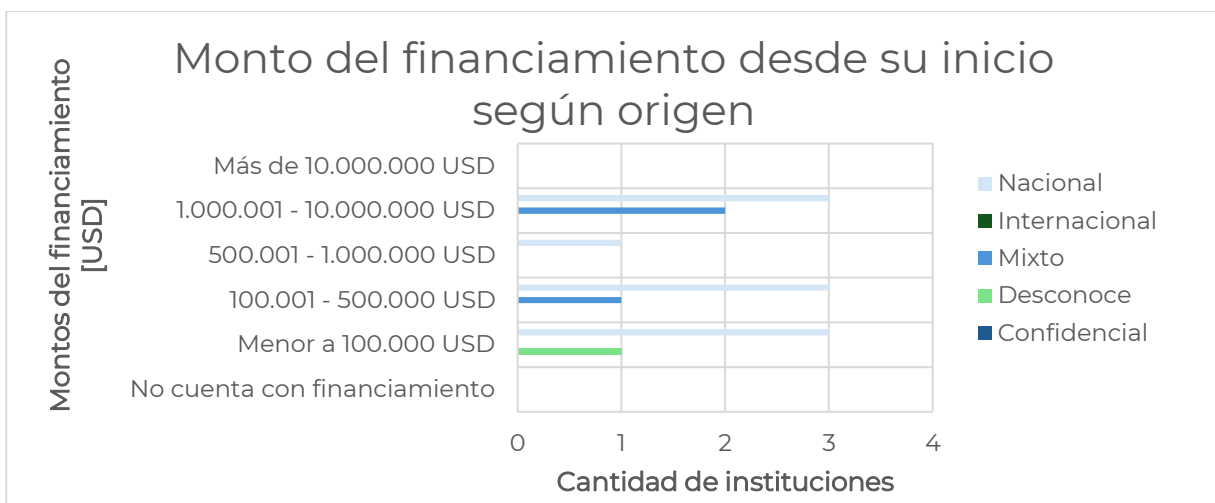
#### 4.2.1.1 Estructura financiera de los proyectos I+D+i

Esta sección aborda la estructura financiera de las instituciones que desarrollan actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) vinculadas al hidrógeno verde en Chile. El objetivo es identificar las principales fuentes de financiamiento, el origen y composición de sus ingresos, y los mecanismos que permiten viabilizar el desarrollo y sostenibilidad de sus proyectos. Esta caracterización permite comprender las condiciones bajo las cuales operan estas instituciones y las capacidades que poseen para implementar y escalar iniciativas tecnológicas en un sector estratégico.

##### 4.2.1.1.1 Financiamiento de los centros I+D+i

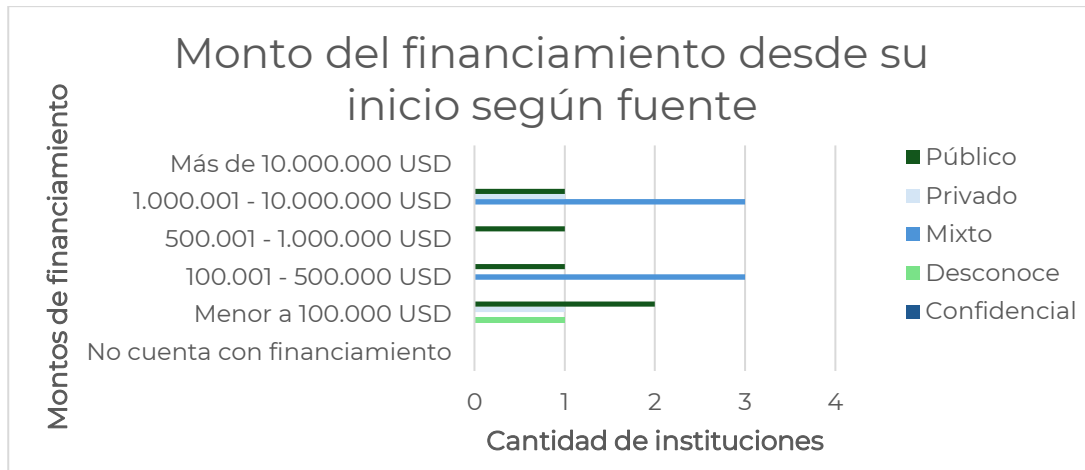
En esta sección se describen las modalidades de financiamiento utilizadas por las instituciones nacionales de I+D+i, detallando los tipos de fondos a los que acceden, su origen público o privado, y las condiciones asociadas a su uso. Se consideran fondos concursables, convenios de cooperación, contratos de prestación de servicios y otras fuentes complementarias, permitiendo observar el nivel de dependencia, diversificación y estabilidad financiera de estas instituciones.

La *Figura N°19*, permite observar la diversidad de orígenes del financiamiento recibido por las instituciones de I+D+i desde su entrada en operación. Se evidencia que, si bien los fondos de origen nacional predominan en la mayoría de los tramos, también existe una presencia significativa de financiamiento mixto, es decir, nacional + internacional, especialmente en los rangos superiores de inversión, de más de 1 millón de USD. Esto indica que muchas instituciones han logrado articular estrategias de financiamiento que combinan recursos internos con cooperación internacional, lo cual resulta clave para sostener iniciativas de mayor envergadura y complejidad tecnológica.



*Figura N°19 Cantidad de instituciones clasificadas según el origen de su financiamiento dentro de distintos rangos de monto de financiamiento. Respuestas 14/21.*

En cuanto a la fuente del financiamiento según la *Figura N°20*, es posible identificar que los fondos públicos constituyen la base principal del ecosistema actual, particularmente en los rangos de hasta 1 millón de USD. Esta tendencia confirma que el impulso inicial a las capacidades de I+D+i en hidrógeno ha estado respaldado mayoritariamente por instrumentos del Estado, como fondos concursables, programas estratégicos o convenios con instituciones públicas. En tanto, las fuentes mixtas aparecen con más fuerza en el rango de 1 a 10 millones de USD, reforzando la idea de que los proyectos de mayor envergadura dependen de alianzas público-privadas o cooperación internacional estructurada.



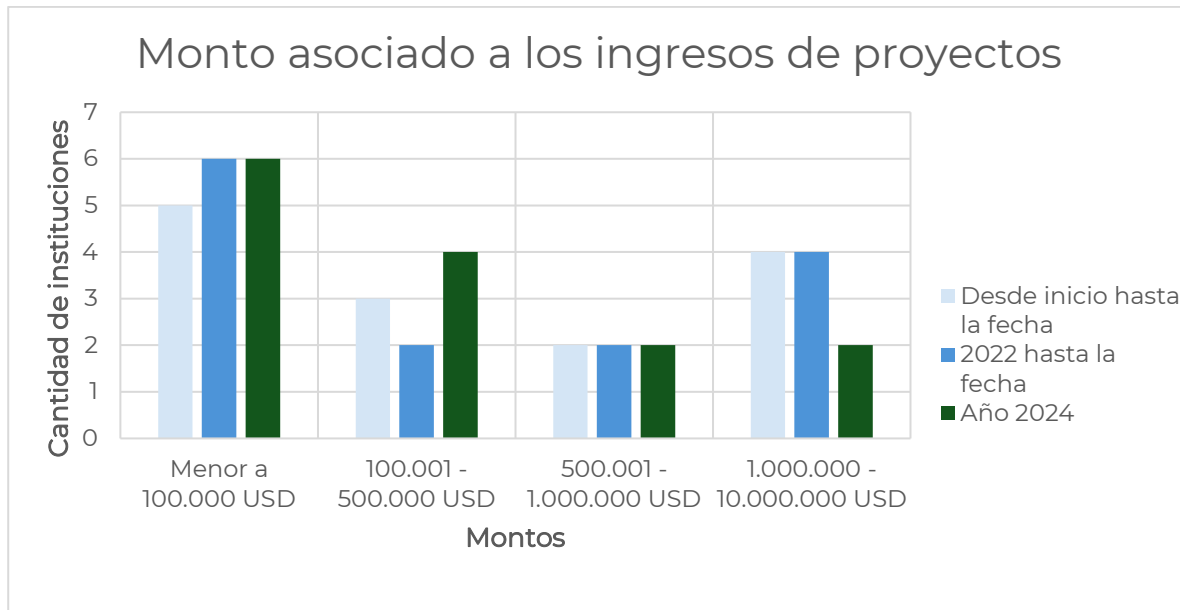
*Figura N°20 Cantidad de instituciones clasificadas según la fuente de su financiamiento dentro de distintos rangos de monto de financiamiento. Respuestas 14/21.*

En conjunto, ambos gráficos reflejan un ecosistema en transición, donde el financiamiento público ha sido fundamental para la etapa inicial de desarrollo, pero donde comienzan a emerger esquemas mixtos que permiten abordar desafíos de mayor escala. Esta configuración transitoria se caracteriza por una alta dependencia de fondos estatales, la aparición de cooperación internacional y una participación aún limitada del sector privado, lo que es propio de ecosistemas que avanzan desde una fase formativa hacia una mayor articulación y sostenibilidad institucional [30]. La consolidación de estas estrategias, junto con una mayor participación del sector privado, será clave para escalar tecnológicamente y asegurar la sostenibilidad financiera de las instituciones dedicadas a la investigación, desarrollo e innovación en hidrógeno verde en el país.

#### 4.2.1.2 Ingresos de los centros I+D+i

Se presenta una caracterización general de los ingresos percibidos por las instituciones de I+D+i encuestadas. El análisis busca identificar la composición de las fuentes de ingreso, incluyendo financiamiento basal, ingresos por proyectos específicos, aportes privados, y otras vías. Esta información permite evaluar el grado de autonomía financiera de las instituciones y su capacidad para sostener operaciones de manera continua.

La *Figura N°21*, muestra la distribución de los ingresos efectivamente percibidos por las instituciones de I+D+i en torno al hidrógeno verde, desagregados en tres periodos: desde su inicio hasta la fecha, entre 2022 y la actualidad, y específicamente durante el año 2024. Esta segmentación permite observar cómo han evolucionado los flujos de ingreso a lo largo del tiempo y qué niveles de captación financiera han logrado sostener las instituciones encuestadas.



*Figura N°21 Cantidad de instituciones según el monto total de ingresos asociados a proyectos, diferenciando periodos desde el inicio, año 2023 y proyecciones para 2024. Respuestas 14/21.*

Se observa que una proporción significativa de instituciones (6 de 14) ha percibido ingresos menores a 100.000 USD en los tres periodos analizados, lo que sugiere una estructura operativa modesta en términos presupuestarios para una parte importante del ecosistema. Sin embargo, en paralelo, existen instituciones que han reportado ingresos superiores a 500.000 USD e incluso en el rango de 1.000.001 a 10.000.000 USD, lo que refleja la existencia de proyectos de mayor envergadura o de estructuras financieras más consolidadas.

La heterogeneidad en los niveles de ingreso también pone de relieve diferencias en la capacidad de ejecución, en el alcance de los proyectos y en la autonomía financiera de las instituciones. Algunas logran sostener operaciones con ingresos más acotados, mientras que otras acceden a recursos significativamente mayores, lo que sugiere diferencias en niveles de madurez institucional, estrategias de financiamiento, o tipos de proyectos desarrollados.

La *Figura N°22*, complementa el análisis anterior al mostrar la distribución porcentual de las fuentes de ingreso por institución, lo que permite visualizar con mayor precisión los niveles de dependencia o diversificación financiera de cada actor del ecosistema. Se observa que, si bien los fondos públicos constituyen la principal fuente de ingresos para la mayoría de las instituciones, existen casos destacados con estructuras más equilibradas. Por ejemplo, Colbún, Power Train y Fraunhofer presentan una proporción relevante de ingresos provenientes de cooperación internacional y fondos

privados, lo que sugiere una estrategia de sostenibilidad más autónoma y orientada a la vinculación con el entorno productivo.

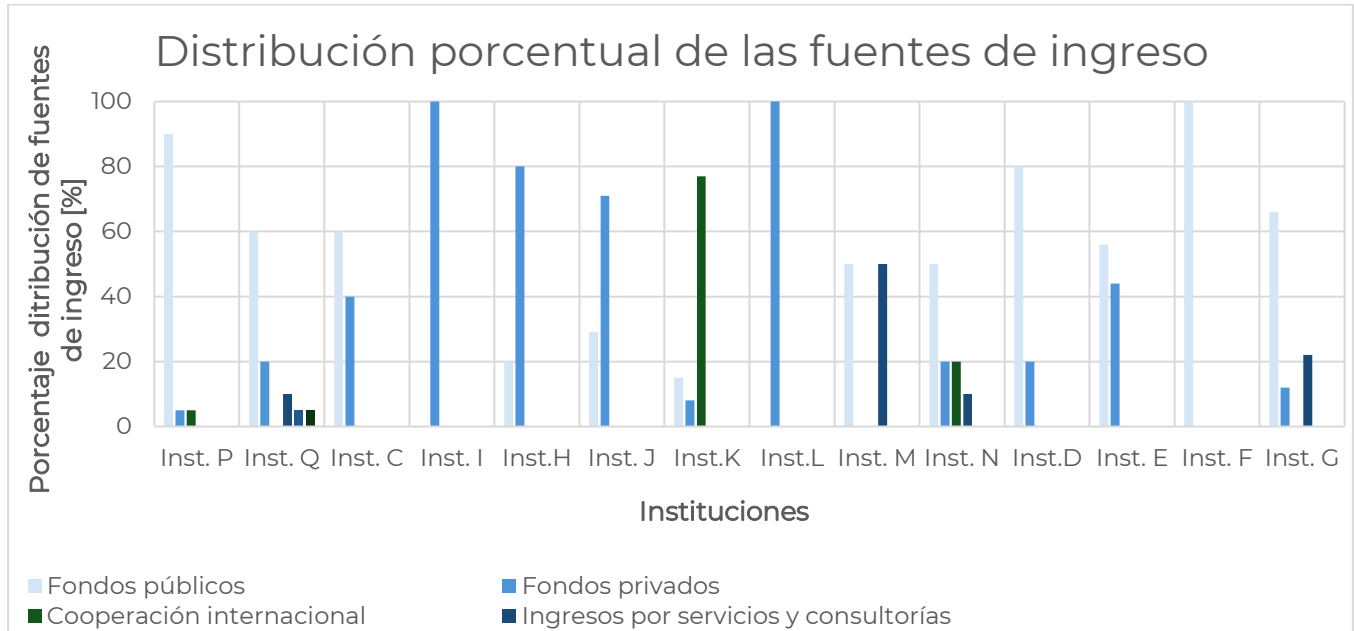


Figura N°22 Distribución porcentual de las distintas fuentes de ingreso reportadas por cada institución, clasificadas en categorías. Respuestas 14/21.

Se puede observar que algunas instituciones presentan estructuras de ingreso concentradas en una única fuente, ya sea pública o privada, lo que podría representar un mayor riesgo en términos de continuidad operativa ante variaciones presupuestarias o cambios en las políticas de financiamiento. Por su parte, la presencia de ingresos por patentes, licencias o consultorías sigue siendo limitada en la mayoría de los casos, lo que refleja una oportunidad para fortalecer mecanismos de transferencia tecnológica y generación de ingresos propios.

Este análisis refuerza la idea de que, si bien el sistema ha comenzado a movilizar ingresos relevantes, aún existe una alta heterogeneidad en las capacidades de generación y diversificación de recursos. Fortalecer modelos financieros mixtos y promover la autonomía económica a través de servicios tecnológicos y propiedad intelectual será clave para consolidar la sostenibilidad institucional de largo plazo.

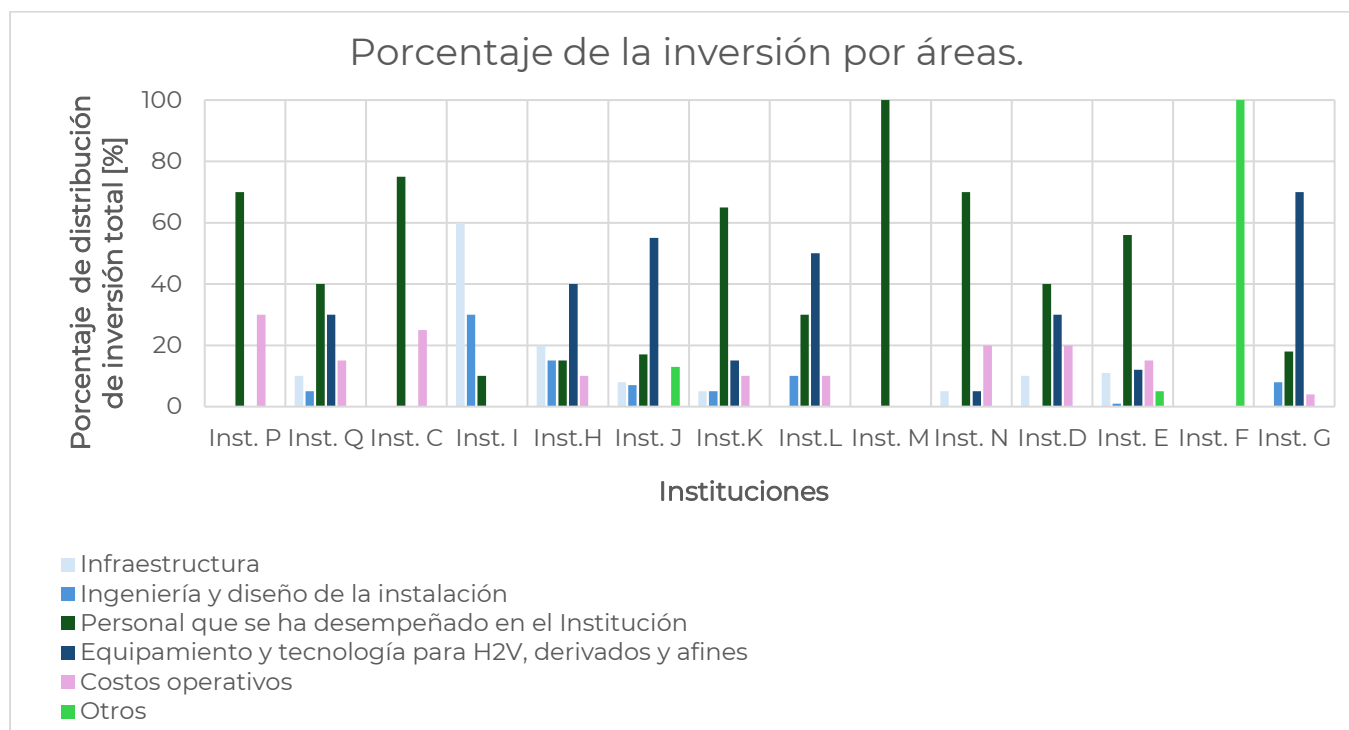
#### 4.2.1.3 Inversión de los centros I+D+i

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la inversión realizada por las instituciones de investigación, desarrollo e innovación en distintas áreas vinculadas al desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados. A partir de la información levantada, se identifican las proporciones relativas de inversión asignadas a infraestructura, diseño e ingeniería de instalaciones, contratación de personal, adquisición de equipamiento tecnológico, costos operativos y otros ítems.

La distribución porcentual de la inversión por áreas, representada en la *Figura N°23*, se evidencia que la mayor parte de las entidades concentra sus inversiones en el área de personal, reflejando la relevancia del capital humano en el fortalecimiento de las capacidades científicas, tecnológicas y operativas. En varios casos, la proporción destinada a este ámbito supera el 70% del total, lo que indica una orientación hacia la consolidación de equipos técnicos estables y altamente especializados.

En segundo lugar, destacan los recursos dirigidos a equipamiento y tecnología vinculada al hidrógeno verde y sus aplicaciones, lo que representa un componente clave para la validación experimental, el pilotaje de soluciones y la ejecución de ensayos aplicados. Este patrón de inversión constituye un indicador del compromiso de las instituciones con el desarrollo tecnológico y la implementación de soluciones concretas dentro del ecosistema nacional.

La inversión en infraestructura física es significativa en el caso de una sola institución, lo que sugiere procesos de instalación o fortalecimiento de capacidades operativas a mediano o largo plazo. Por otro lado, categorías como ingeniería y diseño de instalaciones o costos operativos presentan niveles más bajos en la mayoría de las instituciones, lo que podría estar relacionado con el uso de infraestructura compartida, la externalización de servicios técnicos o con modelos de operación más enfocados en el conocimiento que en la construcción física.

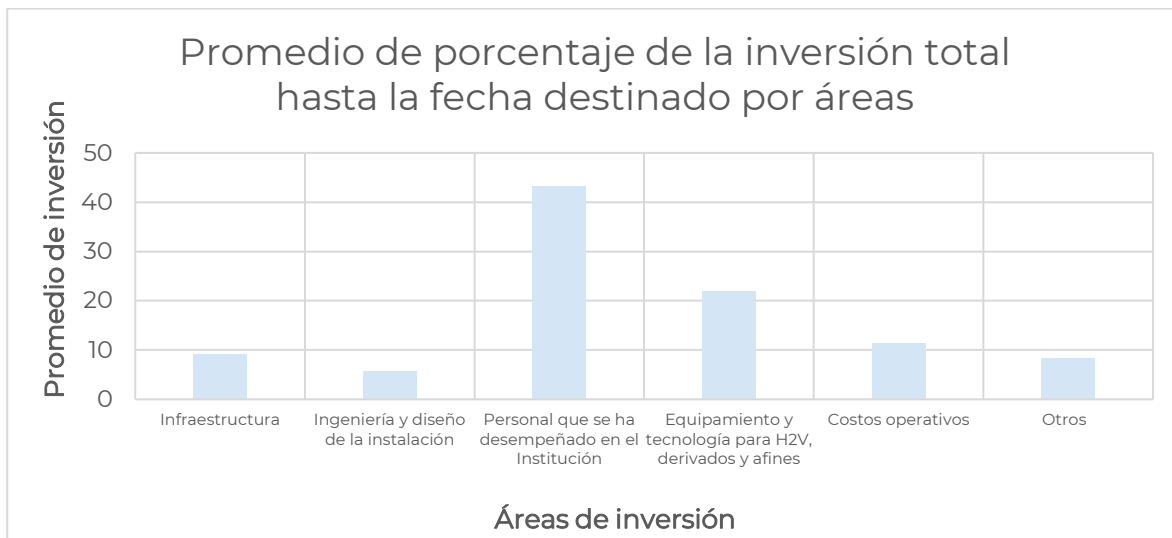


*Figura N°23 Porcentaje de la inversión total por área en cada institución, con valores asignados a infraestructura, ingeniería y diseño, personal, equipamiento y tecnología hidrógeno verde, costos operativos y otros. Respuestas 14/21.*

La *Figura N°24*, complementa el análisis anterior al presentar el promedio del porcentaje de inversión total destinado por áreas en el conjunto de instituciones encuestadas. El dato más relevante es que, en promedio, cerca del 45% de los recursos han sido destinados a personal que se ha desempeñado en la institución, reafirmando la tendencia observada previamente: la consolidación de capacidades humanas especializadas constituye el eje principal del gasto en los proyectos de I+D+i vinculados al hidrógeno verde.

El segundo rubro con mayor participación corresponde a la inversión en equipamiento y tecnología para hidrógeno verde, derivados y afines, que representa aproximadamente un 20% del total, lo que evidencia un esfuerzo transversal por dotar a las instituciones de herramientas técnicas para el desarrollo experimental, la validación de tecnologías y la ejecución de pilotos. Este tipo de inversión es clave para escalar la I+D desde el laboratorio hacia aplicaciones prácticas.

En contraste, áreas como infraestructura, costos operativos, ingeniería y diseño de la instalación y otros, presentan porcentajes promedio significativamente menores, todos bajo el 15%. Esta distribución sugiere que la mayoría de las instituciones ha priorizado la operación técnica y científica por sobre la construcción o ampliación de capacidades físicas, probablemente debido a restricciones presupuestarias o a la existencia de instalaciones compartidas o preexistentes.



*Figura N°24 Promedio del porcentaje de la inversión total hasta la fecha destinado a cada área. Respuestas 14/21.*

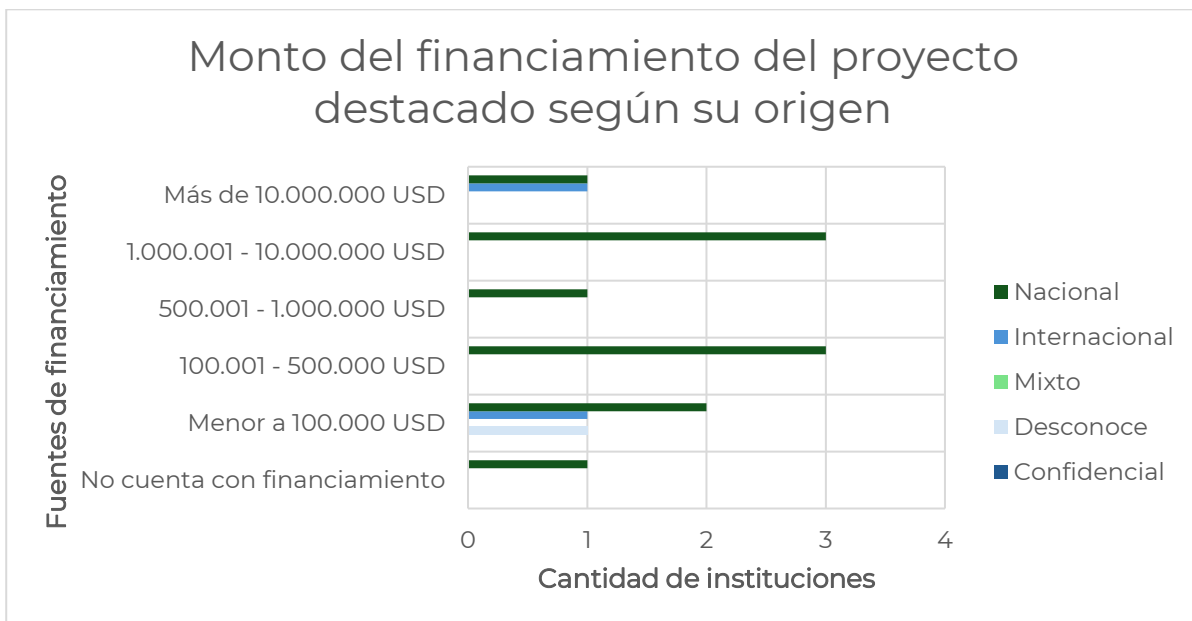
En conjunto, esta distribución promedio confirma que el ecosistema nacional de I+D+i en hidrógeno verde ha orientado sus recursos principalmente al fortalecimiento de capacidades humanas y tecnológicas, pilares fundamentales para el desarrollo de soluciones locales en una industria emergente. No obstante, estos datos también invitan a considerar la importancia de equilibrar la inversión en infraestructura y servicios operativos, especialmente si se busca aumentar el alcance, la replicabilidad y la robustez de los desarrollos científicos y tecnológicos.

#### 4.2.1.4 Financiamiento de proyecto destacado de los centros I+D+i

Esta sección expone un caso específico de financiamiento de un proyecto de I+D+i considerado representativo por la unidad informante. Se describen sus componentes financieros y las fuentes involucradas. Este análisis permite ilustrar, a través de un ejemplo concreto, cómo se viabilizan técnicamente proyectos complejos en el ámbito del hidrógeno verde, y qué aprendizajes pueden extraerse para futuras iniciativas.

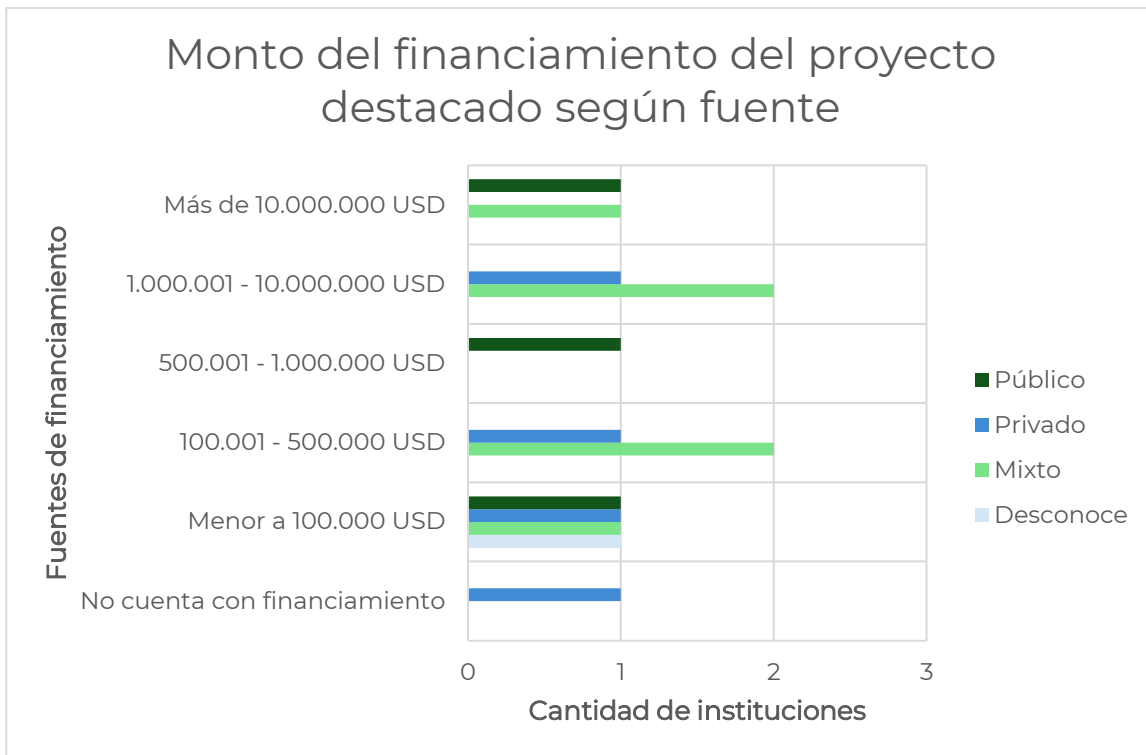
En la *Figura N°25*, se observa que el origen del financiamiento declarado para la mayoría de los proyectos destacados es de tipo nacional, con presencia en todos los rangos de monto. En el tramo de 1.000.001 a 10.000.000 USD, se identifican tres proyectos que reportan financiamiento de origen exclusivamente nacional. Sin embargo, este dato no debe interpretarse como una señal directa de que el sistema público ha financiado estos proyectos por sí solo. Al contrastar con la *Figura N°26*, se evidencia que uno de estos proyectos fue financiado exclusivamente con recursos privados y los otros dos con financiamiento mixto (público y privado). Esto indica que, aunque el origen declarado es nacional, la fuente real de los recursos puede incluir participación significativa del sector privado, lo que refuerza la importancia de considerar conjuntamente ambas dimensiones para comprender la composición financiera de este tipo de proyectos.

Además, en la *Figura N°25*, se destaca la existencia de dos proyectos que superan los 10 millones de USD, uno con financiamiento de origen nacional y otro con origen internacional. Esta distribución evidencia que algunas instituciones han logrado movilizar montos de gran envergadura desde distintos contextos, lo que podría estar vinculado a su grado de madurez institucional o a su capacidad para establecer alianzas estratégicas a nivel nacional e internacional.



*Figura N°25 Cantidad de instituciones por rango de financiamiento de su proyecto destacado según origen del financiamiento. Respuestas 14/21.*

Por su parte, la *Figura N°26*, muestra que, en cuanto a la fuente del financiamiento, predominan los fondos públicos y mixtos en los tramos más altos, mientras que los fondos privados están presentes de forma más puntual, pero también relevantes en proyectos de mayor escala. La combinación de fuentes públicas y privadas para proyectos destacados sugiere un modelo de cofinanciamiento que podría ser clave para sostener iniciativas complejas, especialmente en etapas de implementación, pilotaje o validación tecnológica.



*Figura N°26 Cantidad de instituciones por rango de financiamiento de su proyecto destacado según fuente de financiamiento. Respuestas 14/21.*

En conjunto, estas figuras evidencian que, aunque el origen declarado del financiamiento puede ser nacional, la estructura real de financiamiento es más diversa, y muchas veces involucra esquemas mixtos que articulan inversión pública y privada. Esto resalta la necesidad de fomentar entornos colaborativos, fortalecer instrumentos de cofinanciamiento y mejorar los mecanismos de trazabilidad de las fuentes, con el objetivo de consolidar una base financiera sólida y sostenible para el desarrollo de proyectos de I+D+i en el ámbito del hidrógeno verde.

#### 4.2.2 Proyecto destacado de los centros I+D+i

Esta sección presenta una selección de proyectos que las instituciones nacionales de investigación, desarrollo e innovación han identificado como las iniciativas más representativas en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados para sus instituciones. Se incluyen experiencias que, por su enfoque científico-tecnológico, nivel de desarrollo o articulación con el sector productivo, constituyen aportes

significativos al avance del conocimiento y a la validación de tecnologías aplicadas. La información expuesta considera antecedentes específicos de cada proyecto, tales como objetivos, líneas de investigación, colaboraciones estratégicas y componentes técnicos abordados. Este levantamiento permite visibilizar iniciativas de alto valor referencial que pueden orientar futuras estrategias de fortalecimiento del ecosistema nacional de I+D+i.

La *Tabla N°7*, presenta los proyectos destacados informados por las instituciones nacionales de I+D+i en torno al hidrógeno verde y sus derivados. Se incluye el título de cada iniciativa, su fecha de inicio y término, así como el estado de finalización al momento del levantamiento. Los proyectos seleccionados reflejan distintos niveles de avance y enfoques tecnológicos, abarcando desde producción y aplicaciones industriales hasta reconversión energética, y permiten identificar tendencias en los periodos de ejecución, niveles de madurez y alcance operativo.

*Tabla N°7 Proyecto destacado de centros I+D+i con temporalidad de inicio y término del proyecto, indicando además si el proyecto está o no finalizado. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Inicio del proyecto	Término del proyecto	Proyecto finalizado
Inst. P	Explorador de Hidrógeno Verde	1er semestre 2023	1er semestre 2024	Sí
Inst. Q	Planta de producción de H2V en la UCSC para aplicaciones industriales en el Biobío	1er semestre 2019	2do semestre 2025	No
Inst. C	Desarrollo de arquitectura de alto rendimiento para producción de hidrógeno a partir de energía solar	1er semestre 2022	1er semestre 2023	Sí
Inst. I	Planta H2V Nehuenco	1er semestre 2025	-	No
Inst. H	Blending H2 + GLP/GN	1er semestre 2021	2do semestre 2025	No
Inst. J	Comasa H2V	1er semestre 2024	-	No
Inst. K	Power-to-MEDME	2do semestre 2023	2do semestre 2025	No
Inst. L	Motor Minero Bi-fuel	1er semestre 2024	2do semestre 2025	No
Inst. M	Valle de H2 Angloamerican	1er semestre 2023	2do semestre 2023	Sí
Inst. N	Programa Tecnológico Hidrohaul	2do semestre 2024	2do semestre 2025	No
Inst. D	Generación de hidrógeno verde en celdas de electrólisis con cátodos de materiales de alta entropía	1er semestre 2023	1er semestre 2025	No
Inst. E	Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica	1er semestre 2023	1er semestre 2025	No
Inst. F	H2V para cable de cobre verde	1er semestre 2024	1er semestre 2025	* No ( <i>En proceso de cierre anticipado</i> )
Inst. G	Planta H2V para central térmica	1er semestre 2024	2do semestre 2025	No

A continuación, se presenta una síntesis de los proyectos destacados informados por las instituciones nacionales de I+D+i, seleccionados por su relevancia estratégica, nivel de desarrollo o impacto esperado en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados. La *Tabla N°8*, incluye el título, objetivo principal y una breve descripción técnica de cada proyecto, permitiendo observar la diversidad de enfoques, aplicaciones y niveles de madurez tecnológica presentes en el ecosistema nacional. Los proyectos abarcan desde estudios territoriales, producción descentralizada, reconversión energética, aplicaciones industriales, combustibles sintéticos, hasta validación de nuevas tecnologías para descarbonización.

*Tabla N°8 Objetivo y descripción del proyecto destacado de cada centro de I+D+i encuestado. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Objetivo principal	Descripción
Inst. P	Explorador de Hidrógeno Verde	El objetivo general de este proyecto es contribuir a reducir las barreras de información territorial y de costos en torno a la producción de hidrógeno verde o renovable, como una forma de promover el desarrollo de proyectos de inversión limpios y sostenibles para alcanzar las metas de desarrollo propuestas en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, en la Política Energética Nacional, en la Agenda de Energía 2022-2026, y en especial del Plan de Acción Nacional de Hidrógeno Verde 2023-2030, siendo su objetivo específico el desarrollo de una herramienta de análisis que facilite la evaluación de proyectos de producción de hidrógeno verde o renovable y el desarrollo de la industria del hidrógeno en Chile.	Herramienta web georreferenciada para el cálculo del costo nivelado del hidrógeno. Disponible en <a href="https://hidrogenoverde.minenergia.cl/">https://hidrogenoverde.minenergia.cl/</a>
Inst. Q	Planta de producción de hidrógeno verde en la UCSC para aplicaciones industriales en el Biobío	Desarrollo de aplicaciones de uso del hidrógeno verde en aplicaciones estratégicas para la región del Biobío	Implementación de cadena de valor íntegra del hidrógeno verde en el campus central de la UCSC, para abarcar aplicaciones de uso del hidrógeno verde en electromovilidad, SAF y sistema de respaldo energético
Inst. C	Desarrollo de arquitectura de alto rendimiento para producción de hidrógeno a partir de energía solar	Aumentar la eficiencia de la generación de hidrógeno a partir de energía solar	Se patentó un sistema que alcanza 99,6% de eficiencia al transportar la energía desde la planta PV al electrolizador

Inst. I	Planta H2V Nehuenco	Reemplazo de H2 gris por H2 verde para refrigeración	El proyecto busca desarrollar una planta de hidrógeno verde aislada para el reemplazo de hidrógeno gris para la refrigeración
Inst. H	Blending H2 + GLP/GN	Prueba de Mezclas de H2 con combustibles gaseosos para su aplicación en sistemas térmicos	Mezclas de Gases con H2
Inst. J	Comasa H2V	Producir hidrógeno y amoníaco verde mediante electrólisis alimentada con energía renovable de biomasa. Disminuir emisiones de GEI capturando CO <sub>2</sub> desde las plantas de Comasa, impulsando una matriz energética limpia. Desarrollar fertilizantes sostenibles que mejoren la seguridad alimentaria y promuevan una agricultura resiliente.	Comasa H2V, desarrollará y validará técnica y comercialmente una nueva línea de fertilizantes verdes utilizando como materias primas dos residuos del sector industrial (bio-ceniza y CO <sub>2</sub> v), más el uso y la adopción del Hidrógeno verde, para aprovechar una brecha de mercado y fortalecer la seguridad alimentaria nacional a través de agro insumos más sostenibles y amigables con el medio ambiente, con una perspectiva de economía circular para potenciar y ayudar a la industria agrícola del Institución-sur de Chile.
Inst. K	Power-to-MEDME	Establecer toda la cadena de valor del proceso para la producción sostenible de MeOH y DME a base de hidrógeno solar en el norte de Chile	Desarrollar un piloto industrial de 12 MW de electrólisis para producir metanol y dimetil-éter sintéticos (5000 ton/año), a partir de una fuente biogénica de dióxido de carbono
Inst. L	Motor Minero Bi-fuel	Parametrizar funcionamiento de motor diésel modificado para inyectar amoníaco	Desarrollar y probar en dinamómetro un modelo de operativo de un motor modificado para inyección de diésel y amoníaco.
Inst. M	Valle de H2 Angloamerican	Determinación de potencial de generación y uso de hidrógeno verde zona central de Chile	Estudio es liderado por equipo Angloamerican y realizado en conjunto con Engie Impact. Como parte de este equipo multidisciplinario, el equipo UC colabora en el desarrollo de la metodología que incluye; determinación de zonas de interés para consumo y generación e H2 verde, determinación de parámetros para elección de áreas de interés en la zona central de Chile, determinación de volúmenes de H2 para distintos tipos de tecnologías en el tiempo, definición de proyectos piloto para la zona de interés y evaluación económico-social.
Inst. N	Programa tecnológico Hidrohaul	Incrementar el uso de hidrogeno en la industria logística	Realizar desarrollos y aplicación de equipos de celda de combustible en la industria logística.
Inst. D	Generación de hidrógeno verde en celdas de electrólisis con cátodos de materiales de alta entropía	Disminuir el gasto energético mediante el uso de materiales de alta entropía con alta actividad catalítica frente a la reacción de generación de hidrógeno	-
Inst. E	Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica	Desarrollar un innovador prototipo de quemador de medio poroso inerte (MPI) dual de amoníaco-hidrógeno verde, capaz de operar de forma eficiente y con bajas emisiones, de manera de contribuir a la descarbonización del sector	Se propone el desarrollo de un prototipo de quemador de medios porosos inertes de alta eficiencia y bajas emisiones, que utiliza la mezcla de amoníaco-hidrógeno verde, con el objetivo de ser utilizado posteriormente a nivel industrial en calderas.

		de generación eléctrica nacional.	
Inst. F	H2V para cable de cobre verde	desarrollar software optimizador de descarbonización para los distintos procesos de la cadena de valor del cable de cobre mediante el uso de hidrogeno verde	Busca descarbonizar de forma óptima en costo y tecnología todos los procesos de la cadena de valor del cable de cobre. Considera el desarrollo de modelos particulares de los distintos procesos y el desarrollo de un software que hace uso de los modelos para definir la solución óptima de descarbonización y considera un piloto de toda la cadena de valor del hidrogeno para una aplicación particular en un proceso particular
Inst. G	Planta H2V para central térmica	Certificación de una planta de generación y combustión de hidrogeno verde	Planta de generación, distribución y combustión de hidrogeno verde en un horno isotérmico, con la aprobación de la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC)

En conjunto, los proyectos destacados permiten identificar tendencias clave en el desarrollo del hidrógeno verde en Chile, con un marcado énfasis en la aplicación práctica y la validación de tecnologías en condiciones reales de operación. Las iniciativas analizadas abarcan distintas etapas de la cadena de valor, desde la producción por electrólisis a partir de fuentes renovables hasta la utilización del hidrógeno en procesos industriales como refrigeración, generación térmica y adaptación de motores.

Asimismo, se observa un conjunto de proyectos orientados a optimizar la planificación territorial y mejorar la eficiencia de procesos industriales, mediante herramientas de análisis que permiten estimar costos de producción en distintos territorios o evaluar estrategias de descarbonización en sectores productivos específicos.

Otro grupo de iniciativas busca integrar el hidrógeno en aplicaciones estratégicas, tales como la generación de fertilizantes sostenibles, la mezcla con combustibles gaseosos o la implementación de sistemas de respaldo energético, contribuyendo así a diversificar las soluciones tecnológicas disponibles.

Finalmente, se destacan propuestas con una orientación más experimental, centradas en el desarrollo de nuevos materiales y componentes, como investigaciones sobre cátodos avanzados o el diseño de sistemas de combustión de alta eficiencia. En su conjunto, estos proyectos reflejan un ecosistema en consolidación, caracterizado por la complementariedad entre investigación científica, desarrollo tecnológico y aplicación industrial, configurando una base sólida para el fortalecimiento del sistema nacional de I+D+i en torno al hidrógeno verde. La *Figura N°27*, muestra las temáticas abordadas por cada institución en su proyecto destacado, permitiendo identificar en qué eslabones de la cadena de valor del hidrógeno verde se concentra el trabajo de cada una. En general, se observa una cobertura amplia de temáticas, lo que sugiere un ecosistema diverso y complementario en términos de enfoques tecnológicos.

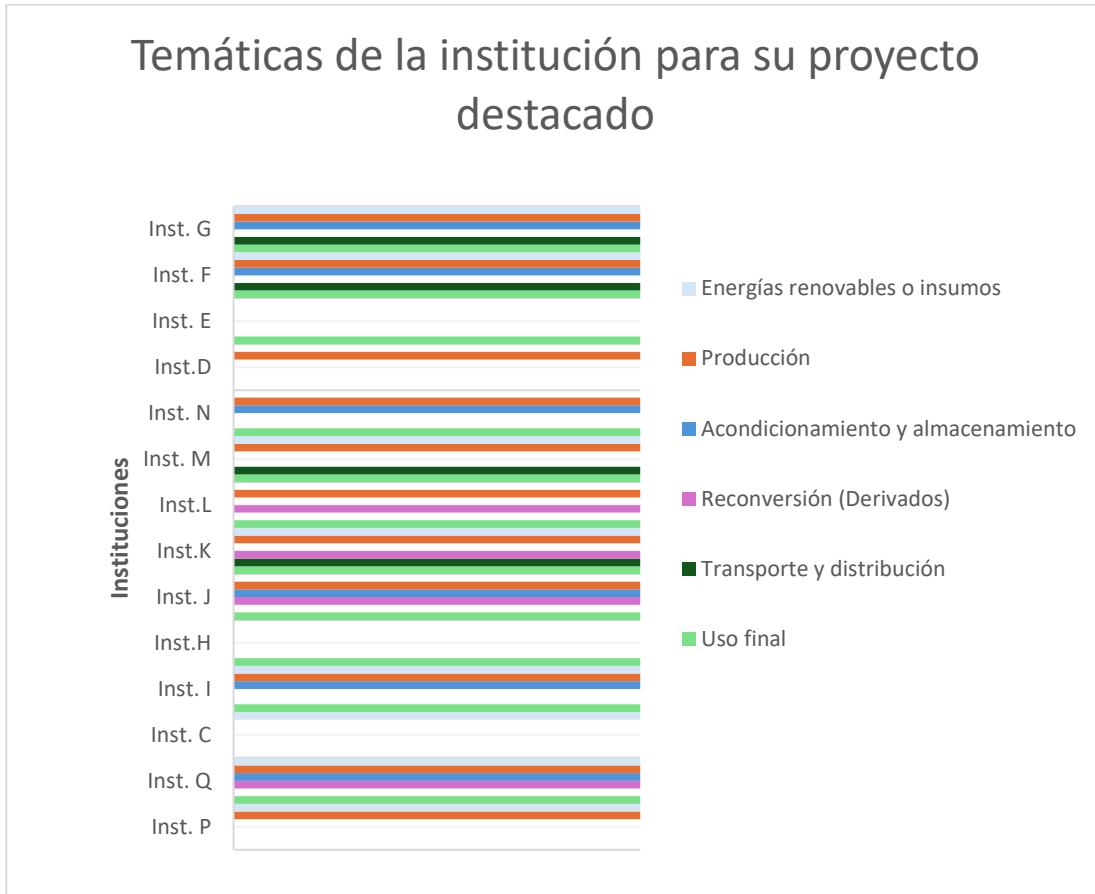


Figura N°27 Tipos de temáticas abordadas en el proyecto destacado de cada institución. Respuestas 14/21.

El uso final es la temática más recurrente, presente en la mayoría de los proyectos, lo que refleja una clara orientación hacia aplicaciones prácticas del hidrógeno, como movilidad, sistemas térmicos o generación eléctrica. La producción de hidrógeno, a través de electrólisis u otros medios, también es una de las áreas con mayor presencia, lo que confirma el interés por desarrollar capacidades propias de generación local. En este contexto, se identifican avances relevantes vinculados a la instalación de fábricas de electrolizadores y al establecimiento de consorcios internacionales para impulsar la manufactura de equipos en el país, con perspectivas de operación comercial hacia el próximo decenio.

Por otra parte, la reconversión hacia derivados energéticos como amoníaco o metanol surge como una línea de trabajo emergente, que apunta a ampliar la cadena de valor y facilitar el almacenamiento y transporte del hidrógeno. Finalmente, la integración de energías renovables y el desarrollo de insumos asociados aparecen de manera transversal en varios proyectos, reforzando la conexión entre la transición energética sostenible y la expansión del ecosistema tecnológico nacional.

El acondicionamiento y almacenamiento, y el transporte y distribución, si bien están menos representados en algunos casos, también forman parte del enfoque de varias instituciones, evidenciando una preocupación por los aspectos técnicos asociados a la manipulación segura y eficiente del hidrógeno.

El gráfico muestra que muchas instituciones abordan simultáneamente múltiples temáticas, lo que sugiere que los proyectos destacados no se limitan a una etapa aislada, sino que buscan integrar distintos componentes de la cadena de valor. Esta visión integral es clave para avanzar hacia una implementación efectiva del hidrógeno verde en el país, y permite proyectar un ecosistema nacional con capacidades crecientes en producción, transformación, logística y aplicación del hidrógeno y sus derivados.

A continuación, en la *Tabla N°9*, se presentan los principales resultados obtenidos por las instituciones en el marco de sus proyectos destacados relacionados con hidrógeno verde y sus derivados. Estos resultados permiten identificar avances en ámbitos como la generación, el acondicionamiento, el uso final y la validación tecnológica, así como en la formación de capacidades institucionales, transferencia tecnológica y generación de conocimiento aplicado. La información fue recopilada a partir de declaraciones directas de las instituciones encuestadas y busca visibilizar el estado de avance técnico y operativo de cada iniciativa.

*Tabla N°9 Resultados obtenidos o esperados de los proyectos destacados de los centros I+D+i. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Resultados obtenidos
Inst. P	Explorador de Hidrógeno Verde	Una herramienta web gratuita y motor de cálculo con información georreferenciada para el análisis de prefactibilidad de proyectos de producción de hidrógeno verde.
Inst. Q	Planta de producción de H2V en la UCSC para aplicaciones industriales en el Biobío	Desarrollo de operación de grúa horquilla usando hidrógeno verde, baterías y supercap donde opera de forma óptima // Obtención de Biocombustibles SAF // Desarrollo de sistemas de respaldo energético utilizando Celdas de hidrógeno verde conectados a red eléctrica
Inst. C	Desarrollo de arquitectura de alto rendimiento para producción de hidrógeno a partir de energía solar	Patente y publicación científica
Inst. I	Planta H2V Nehuenco	Reemplazo del 100% del hidrógeno gris con un sistema autónomo
Inst. H	Blending H2 + GLP/GN	Porcentaje de mezcla obtenido
Inst. J	Comasa H2V	18.000 toneladas de fertilizantes, Uso 3.000 Ton Amoníaco Verde Año en etapa piloto.
Inst. K	Power-to-MEDME	Optimizaciones a lo largo de toda la cadena de valor y preselección de los escenarios de escalamiento más convenientes para mejorar la eficiencia global y reducir los costes del proyecto, incluyendo el análisis técnico-económico
Inst. L	Motor Minero Bi-fuel	Desarrollar kit de retrofit de inyección bi-fuel para motores diesel de alta potencia
Inst. M	Valle de H2 Angloamerican	Estudio es liderado por equipo Angloamerican y realizado en conjunto con Engie Impact. Como parte de este equipo multidisciplinario, el equipo UC colabora en el desarrollo de la metodología que incluye; determinación de zonas de interés para consumo y generación e H2 verde, determinación de parámetros para elección de áreas de interés en la zona central de Chile, determinación de volúmenes de H2 para distintos tipos de tecnologías en el tiempo, definición de proyectos piloto para la zona de interés y evaluación económico-social.
Inst. N	Programa tecnológico Hidrohaul	Validar y demostrar el uso de vehículos a celda de combustibles en aplicaciones de transporte de carga nacional.

Inst. D	Generación de hidrógeno verde en celdas de electrólisis con cátodos de materiales de alta entropía	Se ha obtenido una tasa de generación de hidrógeno mayor que con materiales de Rutenio/Iridio
Inst. E	Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica	Se espera obtener puntos de operación estables con mezclas de amoníaco-hidrógeno en un quemador de medio poroso, con bajas emisiones y altas eficiencias.
Inst. F	Hidrógeno verde para cable de cobre verde	Software
Inst. G	Planta de hidrógeno verde para central térmica	Formación de capital humano avanzando asociado a la instalación y uso de hidrogeno, bajo normativas de seguridad. Estudio de la combustión del hidrogeno bajo normativas de seguridad SEC. Caracterización de distintas mezclas de combustibles con Hidrogeno y sus gases producto. Conocer y desarrollar nuevos negocios asociados al Hidrogeno Verde.

Estos resultados dan cuenta de una diversidad significativa de logros alcanzados por las instituciones a través de sus proyectos destacados, tanto en términos tecnológicos como estratégicos. Se observa una madurez creciente en varios frentes: algunas iniciativas han alcanzado hitos concretos como la creación de herramientas digitales de libre acceso, el desarrollo de software de optimización industrial, la producción de biocombustibles avanzados, o la implementación de equipamiento operativo en contextos reales, como vehículos logísticos o sistemas de respaldo energético. Otras han derivado en resultados intangibles, pero altamente relevantes, como publicaciones científicas, patentes, diseños experimentales o metodologías de planificación territorial.

Además, los resultados reflejan el avance hacia aplicaciones directas del hidrógeno verde en distintos sectores productivos, como la agricultura, la minería, la industria logística, la generación eléctrica y el transporte. Algunos proyectos muestran cómo el hidrógeno puede integrarse en procesos industriales existentes o dar origen a nuevos productos con valor agregado. Asimismo, el trabajo de instituciones académicas destaca por su enfoque metodológico y capacidad de transferencia tecnológica.

El gráfico de la *Figura N°28*, muestra la distribución porcentual de los resultados alcanzados por el proyecto destacado según seis categorías definidas. La porción mayoritaria corresponde a “Aún no se han obtenido resultados aplicables” con un 33%, lo que indica que aproximadamente un tercio de las actividades del proyecto aún no han generado resultados concretos que puedan ponerse en práctica. En segundo lugar, se sitúa “Nuevo proceso” con un 28%, lo que sugiere que el desarrollo e implementación de metodologías o procedimientos innovadores fue un resultado relevante del proyecto. La categoría “Nueva infraestructura” representa el 17% y refleja inversiones en instalaciones o equipamiento específico necesario para apoyar las actividades de I+D+i. En cuarto lugar, aparece “Una o varias patentes” con un 11%, evidenciando esfuerzos de generación de propiedad intelectual derivados del trabajo de investigación y desarrollo. El 6% de los resultados corresponde a “Certificaciones de seguridad bajo normativa de la SEC”, lo que implica que parte del proyecto se enfocó en cumplir estándares regulatorios para garantizar la confiabilidad y seguridad de los desarrollos. Finalmente, “Nuevo producto o servicio” se ubica en un 5%, lo que indica que, aunque existe evidencia de generación de bienes o servicios nuevos, este fue el menor de los resultados cuantificados. En conjunto, estos datos permiten concluir que el proyecto destacó principalmente por la creación de nuevos procesos e infraestructura, mientras que la materialización en productos, servicios o patentes fue de menor magnitud. Asimismo, el elevado porcentaje de resultados aún no

aplicables sugiere que persiste una fase de maduración o validación de tecnologías antes de obtener resultados tangibles para el mercado o la sociedad.

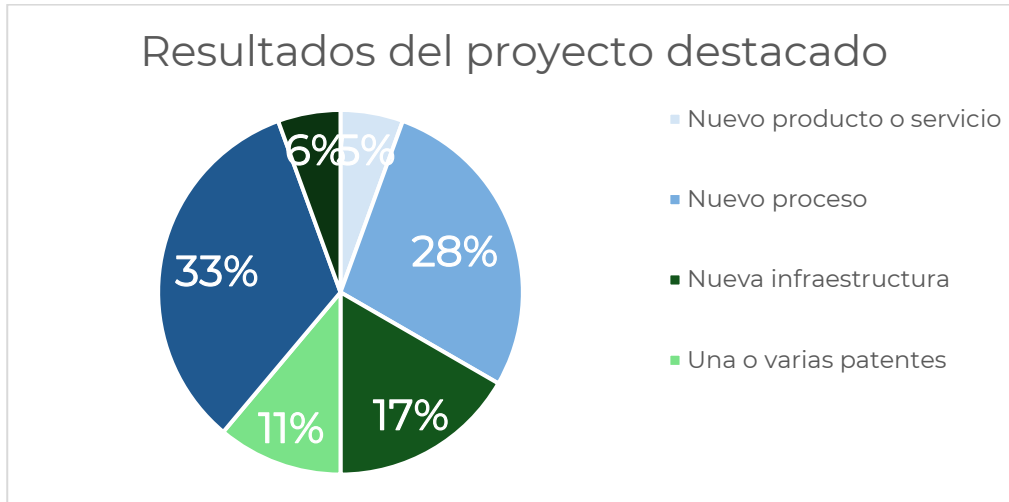


Figura N°28 Resultados del proyecto destacado informados por las instituciones (se permite más de una respuesta). Respuestas 14/21.

A continuación, se presenta la distribución de la difusión del conocimiento generado por el proyecto destacado, complementando los resultados mostrados en la Figura N°29.

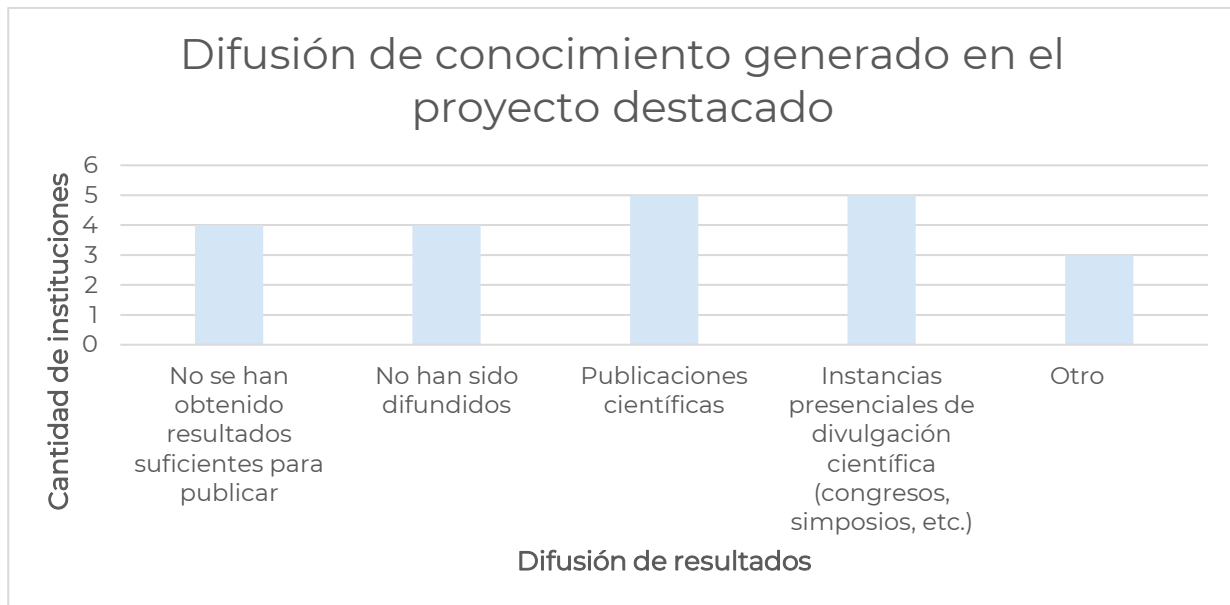


Figura N°29 Modalidades de difusión del conocimiento generado en el proyecto destacado, clasificadas según la cantidad de instituciones que emplean cada tipo. (se permite más de una respuesta). Respuestas 14/21.

En la *Figura N°29* se observa que la mayoría de las instituciones reporta haber generado publicaciones científicas y participado en instancias presenciales de divulgación (5 instituciones en cada categoría). Un número similar de instituciones (4) indicó que aún no cuentan con resultados suficientes para publicar o que esos resultados no han sido difundidos. Finalmente, 3 instituciones señalaron otras formas de difusión no especificadas en las categorías anteriores. Esta información complementa el análisis de resultados de la *Figura N°28*, puesto que revela el nivel de avance en la diseminación del conocimiento derivado del proyecto.

Para cerrar este apartado de caracterización del proyecto destacado, se concluye que, aunque existe un porcentaje significativo de resultados aún no aplicables, las nuevas metodologías y la infraestructura desarrollada han permitido generar un flujo constante de conocimiento científico. La evidencia de publicaciones y participación en eventos especializados demuestra que las actividades de I+D están alcanzando un grado de madurez compatible con la comunidad académica y técnica. No obstante, la proporción de proyectos que no han difundido o que no cuentan con resultados suficientes subraya la necesidad de fortalecer las etapas finales de validación y sistematización de datos. En conjunto, los resultados y su correspondiente difusión confirman que el proyecto destacado cumple un rol central en el fortalecimiento del ecosistema de innovación en hidrógeno verde, aportando tanto a la capacidad instalada como al acervo científico disponible para futuras iniciativas.

### 4.2.3 Proyecciones de los centros I+D+i para el año 2030

En la Tabla N°10 se presentan los desafíos específicos identificados por las instituciones participantes del estudio, para avanzar con éxito hacia el año 2030. A través del proceso de encuestas se obtuvieron los desafíos identificados por las mismas instituciones, a continuación, se presenta la proyección de los centros de I+D+i para el año 2030, considerando los desafíos identificados por cada institución en torno al despliegue y consolidación de iniciativas vinculadas al hidrógeno verde y sus aplicaciones.

*Tabla N°10 Proyección de los centros I+D+i para el año 2030. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Desafíos identificados para 2030
Inst. P	Explorador de Hidrógeno Verde	El desarrollo e implementación de soluciones innovadoras, sostenibles y eficientes en el campo de los combustibles de bajas emisiones, especialmente aquellos derivados del hidrógeno verde y los biocombustibles, a través de un enfoque interdisciplinario y asociativo que aborde los desafíos de los sectores productivos de Chile. Esto incluye el diseño, desarrollo y adopción de tecnologías disruptivas para usos difíciles de electrificar.
Inst. Q	Planta de producción de hidrógeno verde en la UCSC para aplicaciones industriales en el Biobío	Apoyo de privados // financiamiento basal
Inst. C	Desarrollo de arquitectura de alto rendimiento para producción de hidrógeno a partir de energía solar	Financiamiento
Inst. I	Planta H2V Nehuenco	Demostrar la factibilidad de reemplazo de hidrógeno verde por hidrógeno gris considerando que la planta es 100% autónoma, es decir, depende en su totalidad de la generación fotovoltaica
Inst. H	Blending H2 + GLP/GN	Escalamiento
Inst. J	Comasa H2V	Desarrollo de infraestructura. Validación de Tecnologías.
Inst. K	Power-to-MEDME	Conseguir patrocinio para funcionamiento por los siguientes 10 años, expandir nuestro radio de influencia en el país, combinar tecnologías (ERNC/hidrógeno/economía circular)

Inst. L	Motor Minero Bi-fuel	No existe financiamiento para proyectos que buscan ser ejecutados a corto plazo.
Inst. M	Valle de H2 Angloamerican	Financiamiento para actividades permanentes. El equipo está sujeto a financiamientos esporádicos de concursos y proyecto privados
Inst. N	Programa tecnológico Hidrohaul	Falta de infraestructura de dispensa de H2
Inst. D	Generación de hidrógeno verde en celdas de electrólisis con cátodos de materiales de alta entropía	El apalancamiento de recursos externos y el equipamiento científico
Inst. E	Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica	Uno de los principales desafíos es el costo de la adquisición de equipamiento especializado para realizar un análisis completo del proceso de combustión con combustibles verdes, considerando que sus emisiones son distintas a las de los combustibles convencionales, además de sus cinéticas de reacción y componentes químicos implicados.
Inst. F	Hidrógeno verde para cable de cobre verde	Financiamiento, postulamos y participamos como coejecutor en el programa tecnológico, pero el beneficiario no cumplió con sus obligaciones y hemos decidido salir el programa este marzo 2025
Inst. G	Planta de hidrógeno verde para central térmica	El financiamiento a largo plazo es un desafío. Organizar y estructurar una dinámica para que otras Instituciones e/o instituciones puedan realizar investigaciones en nuestra planta. Realizar nuevos negocios como: Venta de Hidrogeno, Transportar hidrogeno al cliente final, son desafíos.

Al analizar esta información en conjunto, destacan algunos elementos comunes y prioritarios que influirán directamente en el desarrollo futuro del ecosistema de innovación en torno al hidrógeno verde en Chile. Entre estos elementos destaca con fuerza la necesidad transversal de financiamiento estable, expresado por gran parte de las instituciones participantes. Lo anterior sugiere la importancia de desarrollar mecanismos sólidos para obtener recursos permanentes, ya sea a través de financiamiento público basal, alianzas con el sector privado o participación en concursos de innovación tecnológica.

Otro desafío clave corresponde al fortalecimiento y desarrollo de infraestructura especializada para el escalamiento tecnológico, mencionado explícitamente por algunas instituciones de este estudio. Este aspecto requiere la coordinación efectiva entre instituciones para compartir capacidades y equipamiento especializado, así como la inversión estratégica en instalaciones para la validación y ensayo de nuevas tecnologías. Asimismo, varios proyectos manifiestan la importancia de la colaboración interdisciplinaria, resaltando la necesidad de integrar distintos actores y enfoques tecnológicos para resolver problemas complejos y alcanzar soluciones disruptivas y sostenibles.

Finalmente, algunos proyectos enfatizan la relevancia del escalamiento industrial para lograr la adopción efectiva del hidrógeno verde, lo que requiere superar no solo desafíos técnicos, sino también regulatorios y logísticos que permitan transitar desde etapas experimentales hacia una operación consolidada. En síntesis, los desafíos enumerados en esta sección indican claramente que, para que los centros I+D+i logren cumplir sus objetivos al 2030, será indispensable una estrategia integral de financiamiento, infraestructura compartida, alianzas colaborativas y políticas de escalamiento industrial que permitan llevar con éxito los avances científicos y tecnológicos al ámbito productivo y social del país.

#### 4.2.4 Caracterización de los proyectos para la formación de personal

En este apartado se caracteriza la oferta de proyectos orientados a la formación de personal especializado en hidrógeno verde, empleando datos cuantitativos recogidos mediante encuestas a instituciones académicas y centros tecnológicos. En primer lugar, *Figura N°30*, muestra la frecuencia

con que se abordan distintos enfoques formativos por parte de las instituciones encuestadas. Se observa que los temas relacionados con tecnologías, seguridad y derivados concentran los valores más altos (4 instituciones cada uno), lo que refleja un interés equitativo en la enseñanza de aspectos técnicos básicos, protocolos de seguridad y aplicaciones de productos derivados del hidrógeno. No obstante, según la información levantada en otras secciones, estas instancias formativas no se condicen con la infraestructura y equipamiento disponibles, ya que muy pocas instituciones y centros I+D+i cuentan con equipamiento para producción o uso final en derivados de hidrógeno. El enfoque en normativas es atendido por 3 instituciones, mientras que la legislación no fue abordada por ninguna de las entidades consultadas, lo que evidencia una brecha crítica en la formación de profesionales sobre marcos regulatorios y aspectos normativos. Economía, gestión de proyectos y operación y mantenimiento aparecen con 2, 3 y 3 respuestas respectivamente, y la categoría “Otro” suma 2 espacios formativos, lo cual sugiere la existencia de áreas emergentes o interdisciplinarias aún en desarrollo.

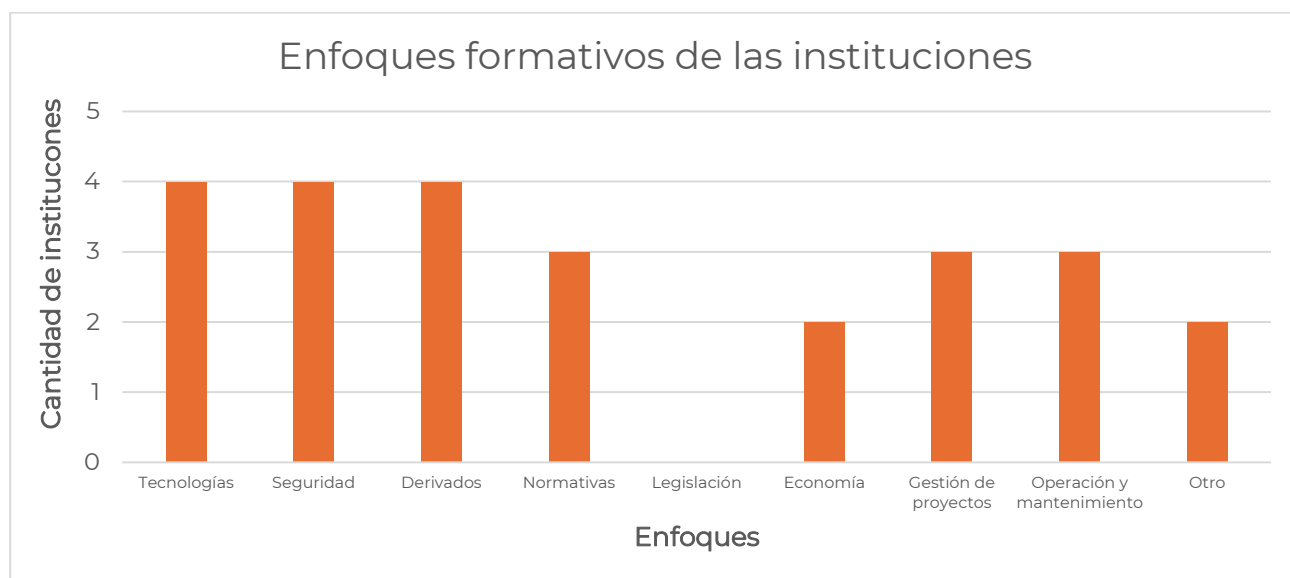
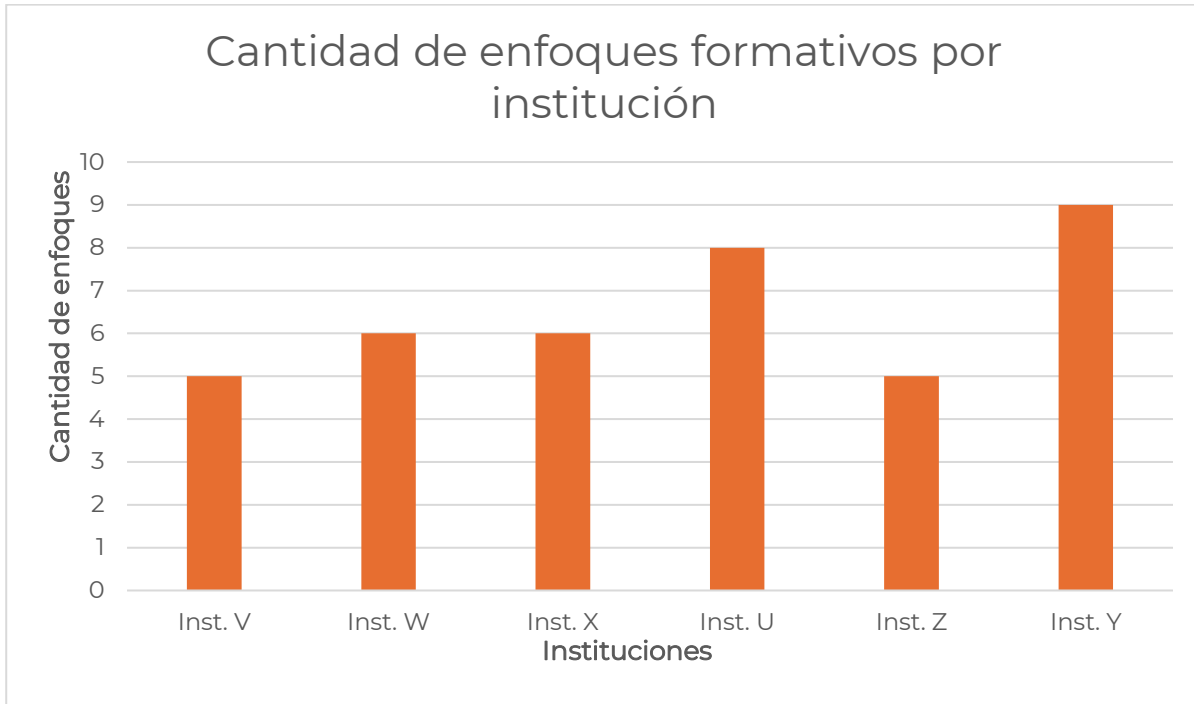


Figura N°30 Enfoques formativos de las instituciones de formación de capital humano. Respuestas 6/21.

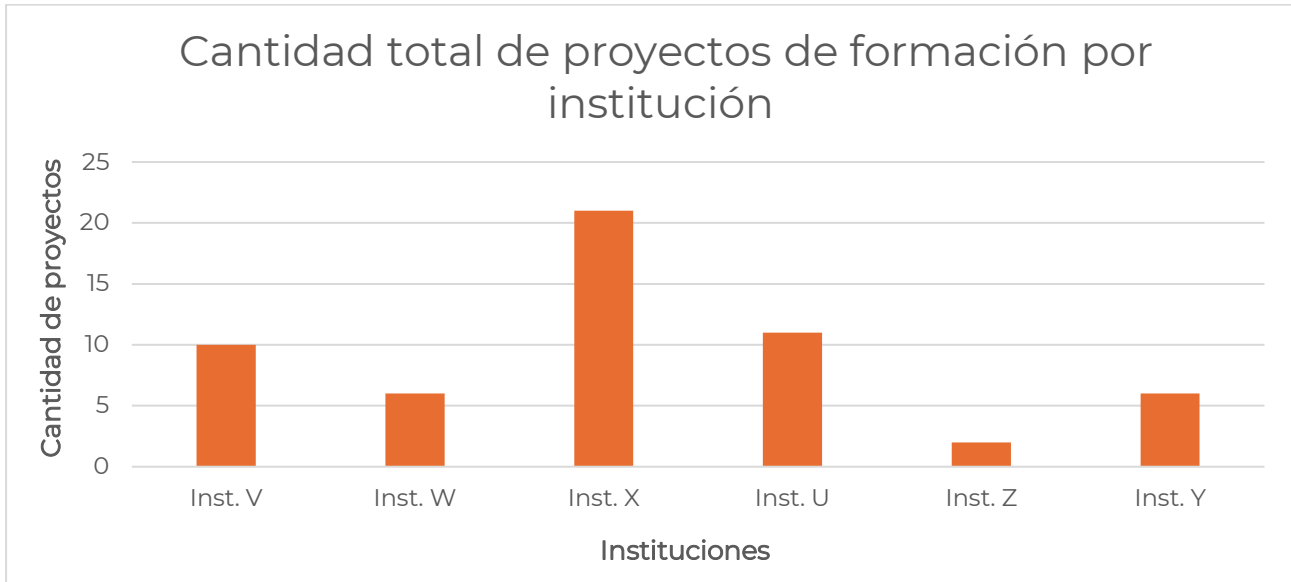
Por su parte, la *Figura N°31*, detalla la cantidad total de enfoques formativos que cada institución implementa en sus programas. Destaca Inst. Y con 9 enfoques, lo que le confiere un carácter multidisciplinario y un amplio espectro de contenidos. Institución U reporta 8 enfoques, seguido de inst. W y inst. X con 6 cada uno, así como inst. Z y inst. V con 5 cada una. Esta variabilidad en la cobertura temática por Institución evidencia diferentes capacidades y recursos para ofrecer formación integral: las instituciones Y y U, se posicionan como líderes en diversificación formativa, mientras que otras instituciones concentran esfuerzos en áreas específicas.



*Figura N°31 Cantidad de enfoques formativos abarcados por cada una de las instituciones participantes de la encuesta. Respuestas 6/21.*

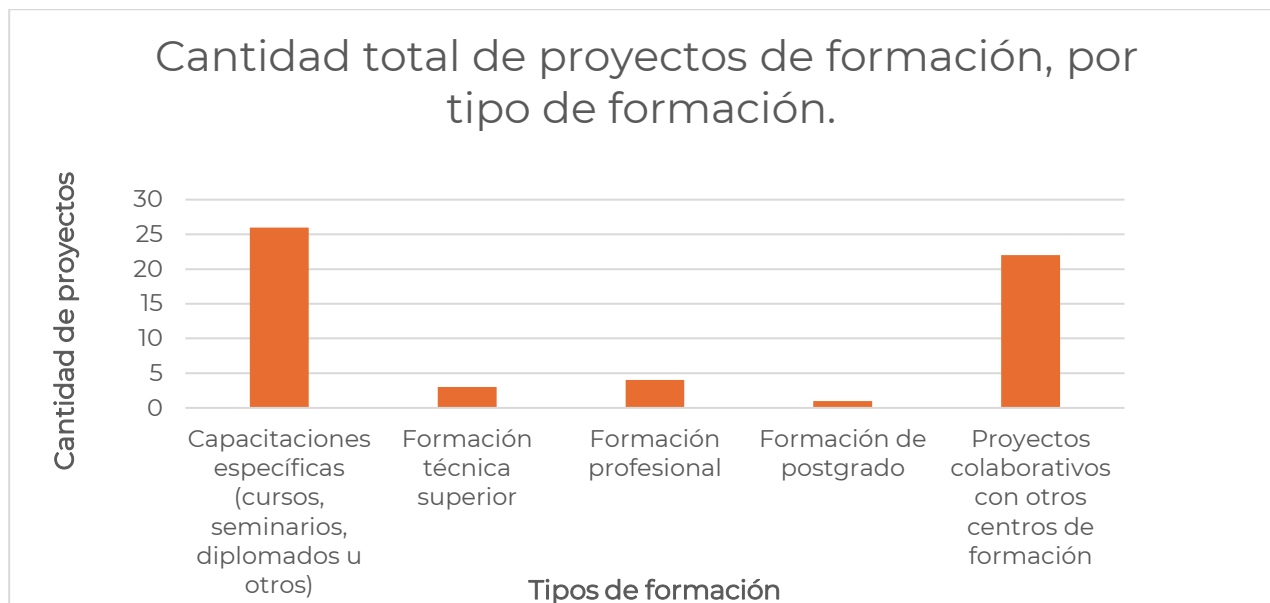
En cuanto a la dimensión de proyectos de formación, *Figura N°32*, se observa una alta concentración de actividades formativas en una de las entidades analizadas, que registra más de veinte proyectos ejecutados, posicionándose como el principal actor en términos de volumen de iniciativas. Le siguen otras organizaciones con cifras que oscilan entre seis y once proyectos, mientras que un grupo menor presenta participaciones más acotadas. Este patrón refleja diferencias en la capacidad operativa y en el grado de consolidación institucional, destacando la existencia de estructuras que cuentan con los recursos y la experiencia necesarios para desarrollar múltiples programas de formación de manera simultánea o continua.

Mientras algunas instituciones enfatizan la diversificación de enfoques, otras apuestan por el volumen de proyectos de formación, reflejando diferentes estrategias de capacitación. Asimismo, los enfoques más recurrentes coinciden con las áreas de conocimiento fundamentales para la adopción segura y eficiente del hidrógeno verde en industrias y laboratorios. Dado que los aspectos regulatorios y normativos no se cubren en ninguno de los programas formativos, se pone de manifiesto la necesidad de incorporar contenidos de legislación y ética para que los profesionales conozcan los marcos jurídicos nacionales e internacionales y las responsabilidades asociadas al uso de tecnología de hidrógeno. En este contexto, los resultados sugieren la necesidad de promover la articulación entre instituciones que destaquen en diversidad temática y aquellas que lideren en número de proyectos, con el objetivo de equilibrar calidad y cobertura en la formación de capital humano. Finalmente, estas evidencias cuantitativas deben servir de base para diseñar políticas de capacitación que aseguren la formación de profesionales competentes en los ámbitos técnicos, regulatorio y económico del hidrógeno verde, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la industria para 2030.



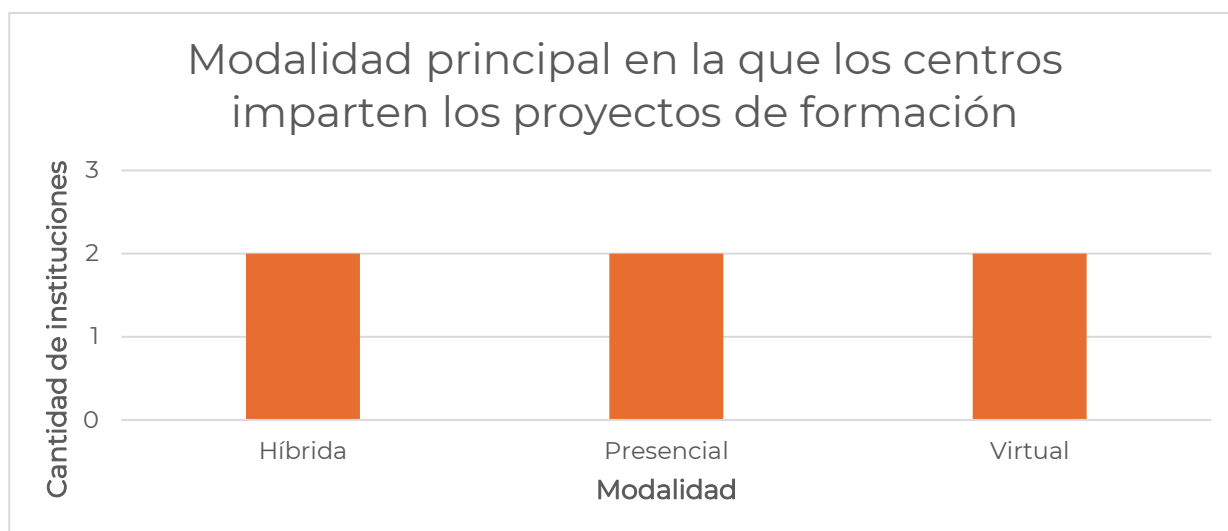
*Figura N°32 Cantidad total de proyectos de formación ejecutados por las instituciones de formación encuestadas. Respuestas 6/21.*

A continuación, se analiza la distribución de los proyectos de formación según su modalidad, tal como se presenta en la *Figura N°33*. Este desglose permite complementar la discusión anterior sobre diversificación y volumen de iniciativas al mostrar que la mayoría de las actividades formativas se concentran en capacitaciones específicas y en proyectos colaborativos con otros centros, mientras que los programas de largo plazo se encuentran significativamente menos representados.



*Figura N°33 Cantidad total de proyectos ejecutados por los centros de formación según tipo de proyecto. Respuestas 6/21.*

En *Figura N°34*, se muestra la modalidad principal en la que los centros imparten los proyectos de formación. Se observa que el número de instituciones que ofrece formación de manera híbrida, presencial y virtual es equivalente, 2 instituciones en cada modalidad, lo que indica una distribución equilibrada entre formatos tradicionales y digitales. Esta igualdad en la adopción de modalidades sugiere que los centros buscan flexibilizar la accesibilidad de los contenidos, atendiendo tanto a quienes requieren interacción directa en instalaciones físicas como a quienes prefieren o necesitan participar de forma remota. Sin embargo, dado el alto número de capacitaciones específicas y proyectos colaborativos identificados previamente (*Figura N°33*), resulta relevante profundizar en los recursos tecnológicos y logísticos disponibles para garantizar la calidad de la experiencia formativa, especialmente en entornos virtuales o híbridos que exigen plataformas de enseñanza y equipamiento multimodal, teniendo en consideración además que, las modalidades virtuales limitan en gran medida la capacidad formativa en áreas técnicas como operación y mantenimiento de equipos, puesto que dichas disciplinas requieren prácticas en terreno y uso de infraestructura especializada. Esta limitación se refuerza con los resultados de las entrevistas que se presentan más adelante en este informe, donde se identifica que las instituciones de formación tienen un enfoque mayor hacia la enseñanza de carreras profesionales, principalmente ingenierías, pero el mantenimiento y operación de equipos específicos de hidrógeno no está siendo abarcado por las entidades identificadas en este estudio.



*Figura N°34 Modalidad principal en la cual las instituciones de formación de capital humano imparten sus proyectos de formación de personas. Respuestas 6/21.*

Por su parte, *Figura N°35*, detalla los principales actores con los que los centros externalizan la formación. Las empresas del rubro destacan con 5 instituciones que recurren a este tipo de colaboración, seguidas por profesionales independientes (4 instituciones) y consultoras especializadas (3 instituciones). Universidades o institutos participan como aliados en 2 casos, mientras que gremios, asociaciones y servicios públicos registran una menor frecuencia (1 institución cada uno). Este reparto evidencia una preferencia por vincularse con actores de la industria y expertos externos para complementar la oferta formativa, aportando conocimiento práctico y actualizado sobre tecnologías de hidrógeno verde. Sin embargo, la limitada participación de servicios públicos y

gremios podría indicar la necesidad de fortalecer la articulación con organismos reguladores y asociaciones sectoriales, a fin de incorporar directrices normativas, estándares de calidad y certificaciones oficiales en los contenidos impartidos.

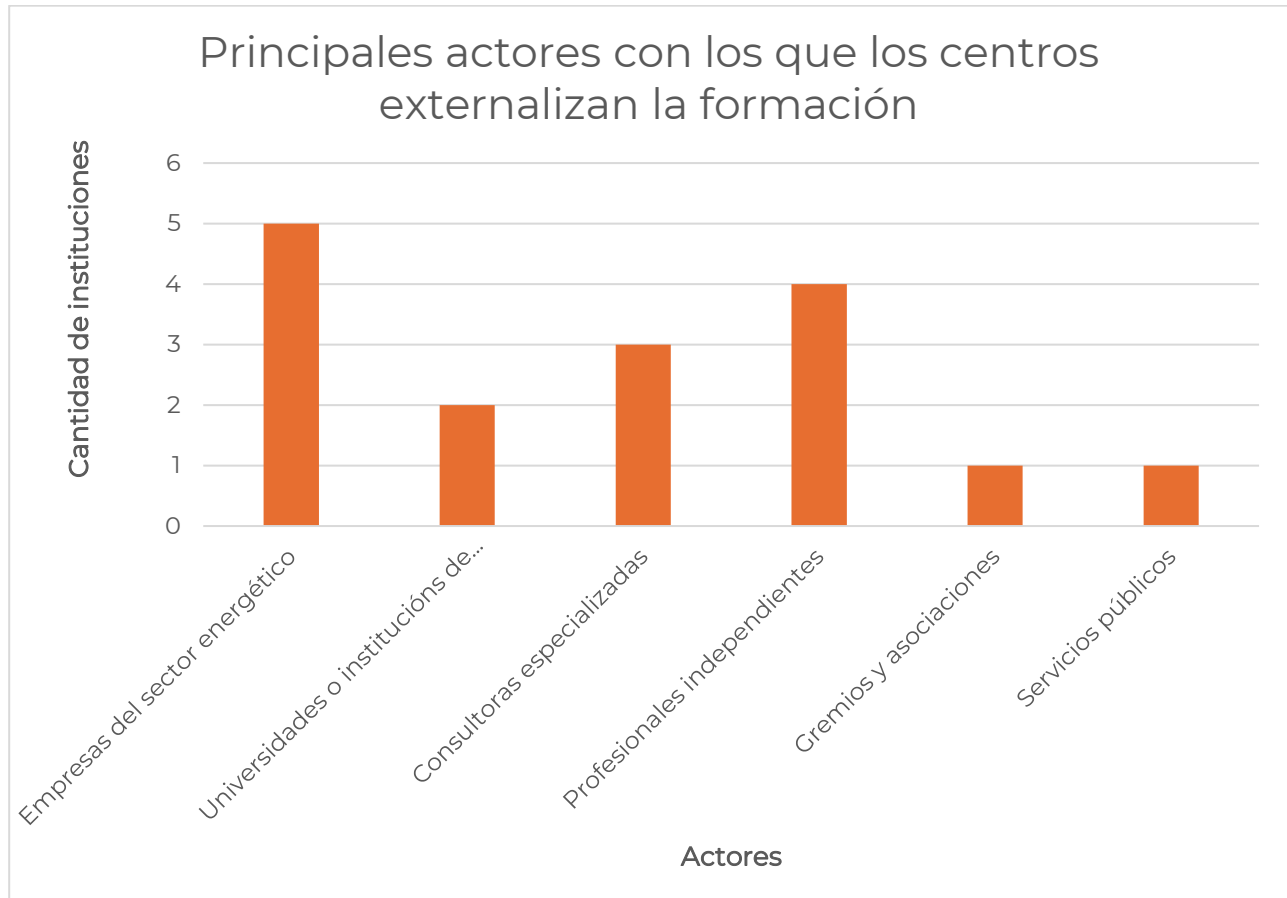


Figura N°35 Número de instituciones que externalizan formación según el tipo de actor (Se admiten más de una respuesta). Respuestas 5/21.

De las respuestas registradas en la encuesta se concluye que la totalidad de las instituciones encuestadas (6/21) participa en la realización de capacitaciones específicas, mientras que la formación en niveles formales es significativamente menor: formación técnica superior (1/21), profesional (2/21) y de postgrado (1/21), y no se registran otros formatos de capacitación, ver *Tabla N°11*. Este resultado indica que el énfasis principal de las entidades está en ofrecer cursos, seminarios y diplomados de corta duración que responden a necesidades puntuales del sector, a diferencia de programas formales de largo plazo que implican mayor inversión de tiempo y recursos.

Tabla N°11 Participación de las instituciones en distintos formatos de formación de personal. Tipos de personal 5.

Formato de formación de personal	Cantidad de instituciones que lo realizan
Capacitaciones específicas	6/21
Formación técnica superior	1/21
Formación profesional	2/21
Formación de postgrado	1/21
Otros	0/21

La alta proporción de capacitaciones específicas sugiere que las instituciones buscan flexibilidad para actualizar conocimientos y habilidades en tecnologías del hidrógeno verde de manera ágil, ajustándose a la rápida evolución de esta industria. Además, en más de una ocasión las encuestas revelaron que las instituciones no consideran necesario generar carreras exclusivas para el hidrógeno verde y sus derivados; en su lugar, se mantiene la preferencia por capacitaciones específicas que cubran distintas etapas y necesidades de la industria a lo largo de la cadena de valor. Por otro lado, la escasa representación de la formación técnica superior y de postgrado revela brechas en el desarrollo de trayectorias académicas formales que permitan a los profesionales profundizar en competencias especializadas, como el diseño de sistemas de electrólisis, la implementación de celdas de combustible o el análisis integral de procesos termoquímicos. Asimismo, la limitada proporción de formación profesional (2/21) podría reflejar la dificultad de articular planes de estudio que permitan certificar competencias específicas en operación y mantenimiento de equipos, un área crítica para la adopción segura y eficiente de tecnologías de hidrógeno en entornos industriales.

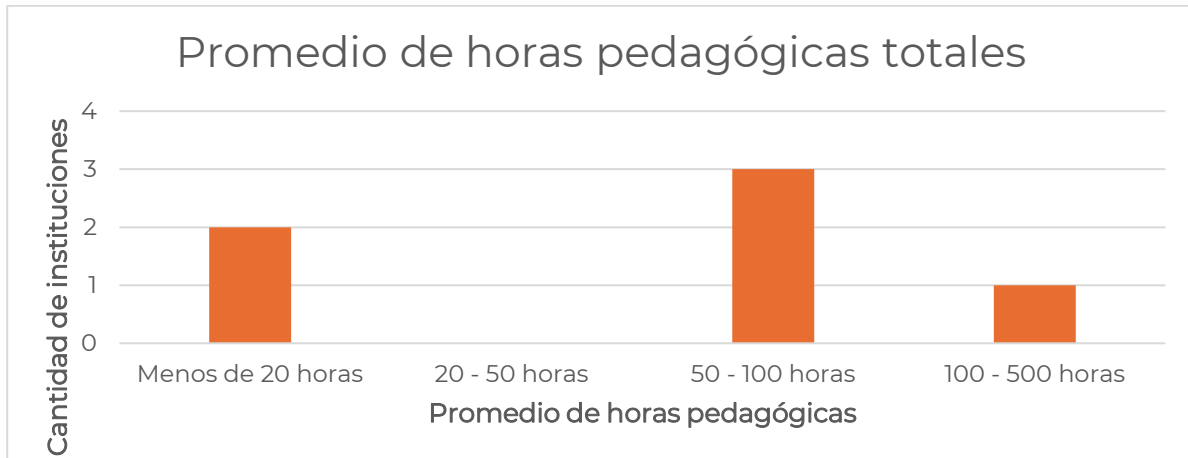
En consecuencia, y considerando los hallazgos previos sobre la disponibilidad de infraestructura y equipamiento (secciones anteriores), se identifica la necesidad de fortalecer la oferta de programas formales de formación técnica y de posgrado que involucren práctica en laboratorios y bancos de prueba. Dicha estrategia permitiría complementar las capacitaciones específicas con posibilidades de profundización académica; al mismo tiempo, garantizaría la formación de capital humano capaz de operar, mantener y optimizar sistemas de producción y uso final de derivados de hidrógeno.

#### 4.2.4.1 Capacitaciones específicas

Esta sección presenta un análisis de las capacitaciones específicas ofrecidas por las instituciones nacionales de formación que participaron en el estudio, en el contexto de la preparación de capital humano para la industria del hidrógeno verde y sus derivados. Estas capacitaciones incluyen programas de corta y mediana duración, como cursos especializados y diplomados, enfocados en áreas técnicas clave para la operación, mantenimiento y gestión de tecnologías asociadas al hidrógeno. El objetivo es identificar el alcance y la orientación de estas instancias formativas, así como su grado de alineación con los requerimientos prácticos de la cadena de valor del hidrógeno, considerando tanto su dimensión experimental como industrial.

En la *Figura N°36*, se observa el promedio de horas pedagógicas para cada institución que imparte capacitaciones específicas. Dos instituciones informan programas con menos de 20 horas de duración, tres registran un rango entre 50 y 100 horas, y una institución desarrolla cursos de 100 a 500

horas. Este espectro indica que, aunque hay ofertas breves centradas en contenidos muy puntuales, la mayoría de las capacitaciones específicas contempla formatos intermedios (50-100 horas), lo cual sugiere un enfoque equilibrado entre profundidad teórica y práctica sin requerir el desplazamiento a un ciclo regular de formación técnico-superior.



*Figura N°36 Cantidad de instituciones según el rango de horas pedagógicas totales ofrecidas. Respuestas 6/21.*

Por su parte, *Figura N°37*, muestra el porcentaje aproximado de dedicación que cada institución asigna a hidrógeno verde y derivados dentro de su oferta de capacitaciones. Institución W, Institución U e Institución Z dedican el 100% de su actividad formativa a estos temas, lo que denota un compromiso pleno con el nicho de hidrógeno. Institución V asigna un 60% de su programación a estos contenidos, mientras que Institución X e Institución Y no registran dedicación exclusiva a hidrógeno, lo que indica que sus capacitaciones específicas pueden combinar distintas temáticas o enfatizar otro tipo de tecnologías. Estos resultados confirman que algunas instituciones se especializan completamente en hidrógeno, mientras que otras ofrecen formación sobre una gama más amplia de temas técnicos y, en consecuencia, reservan un porcentaje menor de su tiempo pedagógico para hidrógeno y derivados.



Figura N°37 Porcentaje aproximado de dedicación a hidrógeno verde y derivados para cada institución. Respuestas 4/21.

En la *Figura N°38*, se detallan los enfoques formativos abordados dentro de las capacitaciones específicas por todas las instituciones. En contraste con la caracterización general de los centros, donde ningún programa consideraba contenidos de legislación, en el ámbito de las capacitaciones específicas se observa que 3 instituciones sí incluyen este enfoque, lo cual refleja un reconocimiento puntual de los marcos normativos cuando se trata de cursos concretos. Asimismo, tecnologías y normativas son los tópicos que abarcan el mayor número de instituciones, seguidos por seguridad, derivados, gestión de proyectos y operación y mantenimiento. El enfoque en economía es atendido por 4 instituciones y “Otros” por 1. Este patrón demuestra que, si bien la oferta global de los centros no prioriza la legislación de forma transversal, las capacitaciones específicas sí incorporan este componente en algunos casos, evidenciando una respuesta parcial a la necesidad de formar profesionales capaces de navegar el entorno jurídico del hidrógeno verde en Chile. Sin embargo, la presencia de “Derivados” en 5 instituciones contrasta con el limitado equipamiento disponible para prácticas en procesos de producción y uso final de estos compuestos, evidenciando nuevamente una brecha entre contenidos teóricos y capacidades prácticas.

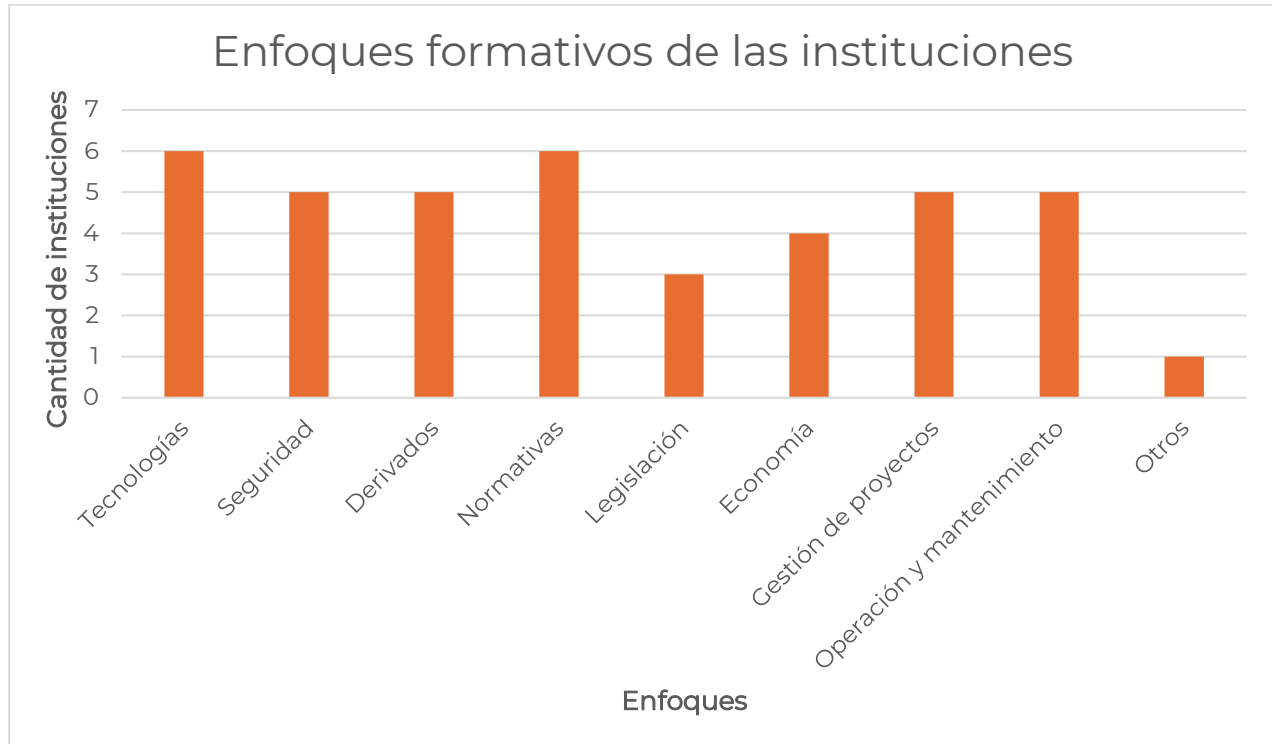


Figura N°38 Cantidad de instituciones que ofrecen formación en cada enfoque. Respuestas 6/21.

En la *Figura N°39*, se observa el nivel de importancia que las instituciones asignan a cada etapa de la cadena de valor del hidrógeno verde en la elaboración de sus mallas curriculares. El enfoque en tecnologías es calificado como “muy importante” por cinco instituciones, mientras que una sólo lo considera con “poca consideración”, lo cual refleja la prioridad otorgada al conocimiento técnico en producción y manejo de sistemas de hidrógeno. En seguridad, cuatro instituciones lo valoran como “muy importante” y una se ubica en “neutro”, lo que evidencia que la formación en normas y protocolos de seguridad es fundamental, aunque aún existe un espacio para reforzar este aspecto en al menos un caso. En derivados, tres instituciones lo consideran “importante”, dos como “muy importante” y una como “neutral”, indicando que la generación y uso de productos derivados del hidrógeno tiene una alta relevancia en los planes curriculares, aunque no en todos los casos alcanza la máxima prioridad. El componente de normativas es “muy importante” para cinco instituciones y figura con “poca consideración” en una, lo que coincide con la identificación de esta área como crítica para asegurar el cumplimiento de estándares regulatorios, aunque una institución aún no lo integra de forma consistente.

En cuanto a legislación, dos instituciones la catalogan como “importante” y otras dos como “neutra”, sin que ninguna la considere “muy importante”; esto denota que, aunque se reconoce su valor, no se otorga una relevancia máxima al conocimiento de marcos jurídicos en todas las mallas curriculares. El área de economía es valorada como “importante” por tres instituciones y como “poca consideración” por dos, sin respuestas en categorías superiores, lo que sugiere que el análisis económico de proyectos de hidrógeno verde está presente pero no logra aún un consenso de alta prioridad entre los centros formadores. Respecto a la gestión de proyectos, una institución sitúa este enfoque en “neutro”, otra en “poca consideración” y tres en “muy importante”, lo que muestra que la capacidad de planificar, ejecutar y supervisar proyectos de hidrógeno es considerada esencial en la

mayoría de los casos, aunque no en todos se alcanza la máxima valoración. Finalmente, operación y mantenimiento es considerado “muy importante” por tres instituciones, “importante” por una y “neutro” por dos, demostrando que la enseñanza práctica de operación de equipos y mantenimiento es prioritaria en varios centros, pero existen percepciones variadas en torno a su nivel de urgencia curricular. La categoría “Otros” no presenta valoraciones, lo que indica que las áreas emergentes o no clasificadas específicamente no son consideradas dentro del esquema de importancia para las mallas actuales. Este análisis revela que, en líneas generales, las instituciones coinciden en otorgar máxima prioridad a tecnologías, seguridad y normativas, mientras que otras etapas como legislación y economía requieren una mayor atención para equilibrar la formación integral en la cadena de valor del hidrógeno verde.

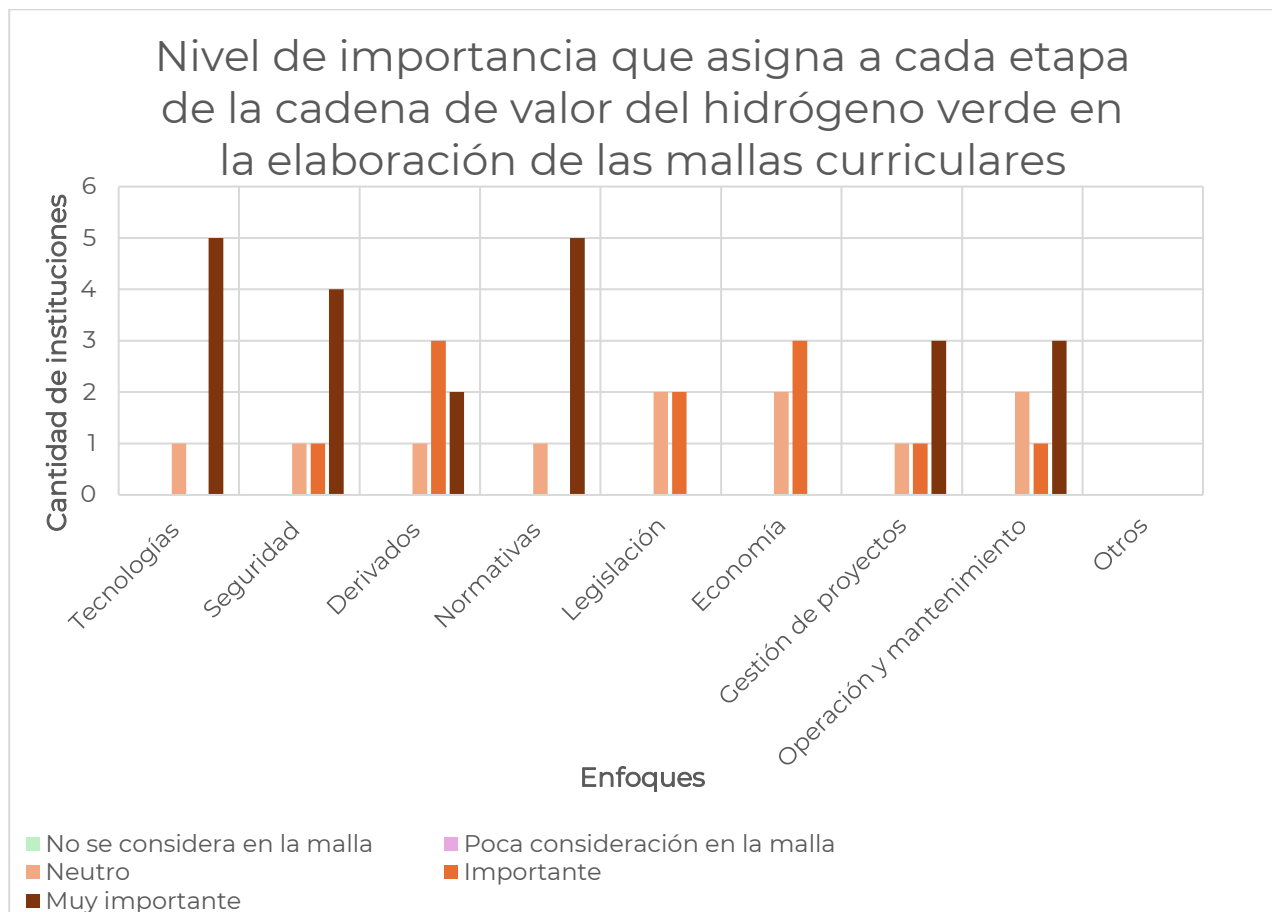


Figura N°39 Cantidad de instituciones que asignan niveles de importancia a cada etapa de la cadena de valor del hidrógeno verde en la elaboración de sus mallas curriculares. Respuestas 6/21.

En la Figura N°40, se observa que todas las entidades encuestadas han desarrollado un número de proyectos de capacitación en un rango relativamente estrecho, lo que evidencia un esfuerzo equilibrado en la implementación de cursos especializados en hidrógeno verde. El número de iniciativas por organización se sitúa mayoritariamente entre cinco y ocho, lo que indica que, aunque existen leves diferencias, en conjunto las instituciones mantienen una oferta formativa similar en

términos de volumen y alcance. Este patrón sugiere una distribución homogénea de la actividad formativa dentro del ecosistema, reflejando un compromiso compartido con la difusión de conocimientos técnicos y la formación de capital humano especializado.

Dicha proximidad en la cantidad de proyectos sugiere que no existe un único actor dominante, sino que varias instituciones lideran de forma similar la provisión de capacitaciones específicas. Por ejemplo, aunque Institución U e Institución Y presentan el valor máximo, esto no se aleja significativamente de los seis o siete cursos de otras entidades. Por su parte, Institución Z, con cinco proyectos, sigue estando muy cerca de la media, lo que evidencia que todas las instituciones comparten un nivel de compromiso comparable en la generación de oportunidades de formación práctica para el sector.

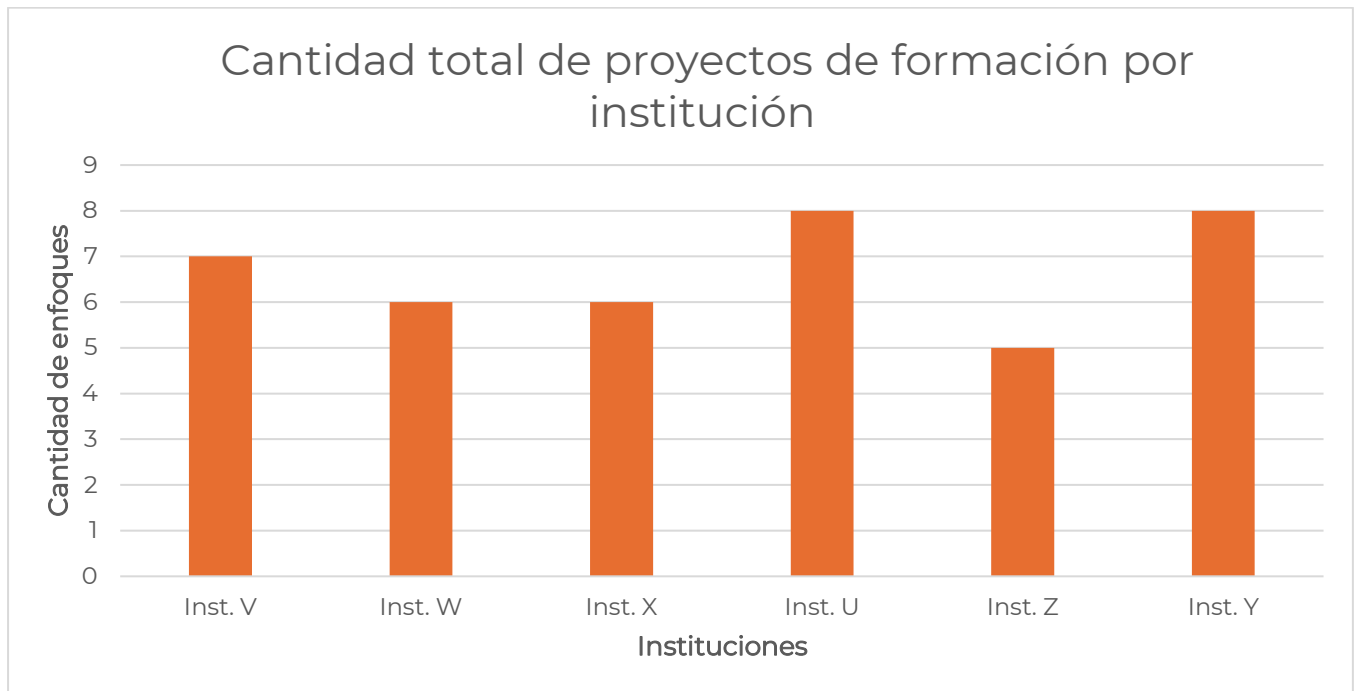
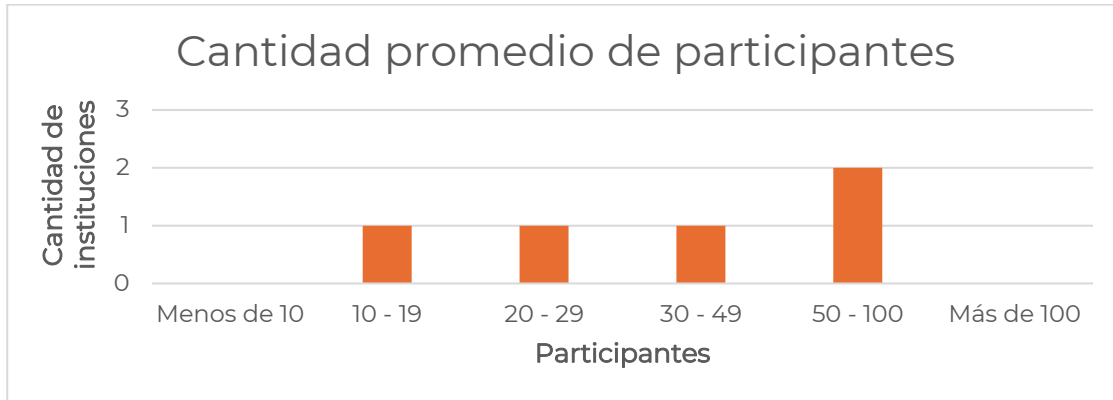


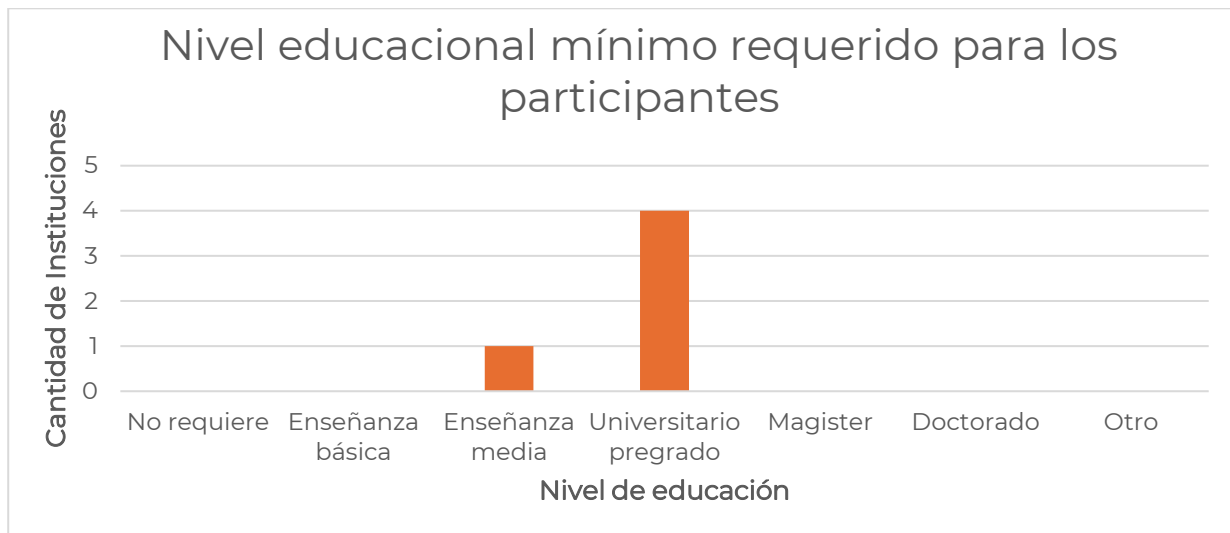
Figura N°40 Número total de proyectos de formación desarrollados por cada institución. Respuestas 6/21.

En cuanto al tamaño de las sesiones formativas, la *Figura N°41*, muestra que dos instituciones estiman un promedio de 50-100 participantes por proyecto, mientras que una institución reporta un rango de 30-49 participantes, otra 20-29 y una más 10-19. No se registran capacitaciones con menos de 10 o más de 100 participantes en promedio. Esto denota que las capacitaciones específicas suelen diseñarse para grupos de tamaño medio, con foco en facilitar interacción directa y práctica, evitando los extremos de grupos muy reducidos o masivos.



*Figura N°41 Cantidad de instituciones según el rango de participantes promedio en sus actividades. Respuestas 5/21.*

El nivel educativo mínimo requerido para los participantes de las capacitaciones específicas se presenta en la *Figura N°42*. Cuatro instituciones establecen como requisito mínimo educación universitaria pregrado, una exige enseñanza media y ninguna solicita niveles inferiores o superiores, como magíster o doctorado. Esta tendencia demuestra que las capacitaciones específicas se orientan principalmente a profesionales, técnicos o egresados de carreras afines, priorizando un nivel de conocimiento previo que garantice comprensión de conceptos avanzados de hidrógeno y derivados.



*Figura N°42 Cantidad de instituciones según el nivel educativo mínimo exigido a los participantes. Respuestas 5/21.*

En *Figura N°43*, se observa la cantidad promedio de personal docente y técnico involucrado en cada proyecto de capacitación específica. Dos instituciones asignan menos de cinco personas, mientras que una moviliza entre 5-9, otra 10-15 y una más 15-19. En promedio, la mayoría opera con equipos de entre cinco y diecinueve personas, lo cual refleja la necesidad de coordinar varios especialistas como

profesores, instructores y asistentes técnicos, para abordar contenidos teóricos, demostraciones prácticas y laboratorios. Esto es consistente con la cobertura multidisciplinaria de tecnologías, normativas, seguridad y operación de equipos.

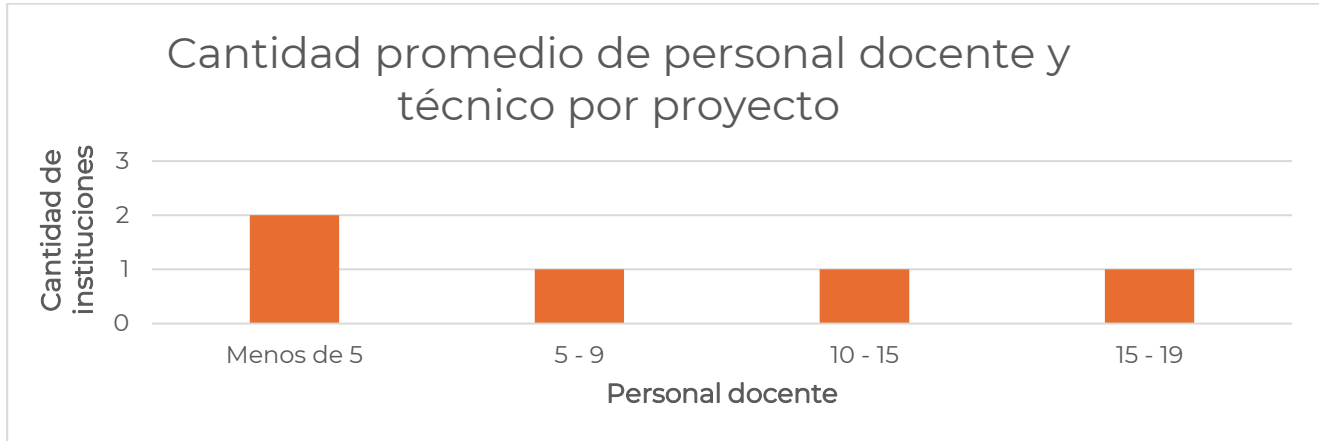


Figura N°43 Número de instituciones según el promedio de personal docente y técnico asignado por proyecto, distribuido en rangos de cantidad de personas. Respuestas 5/21.

El análisis del costo promedio por proyecto de las capacitaciones específicas, mostrado en la Figura N°44, indica que dos instituciones consideran la información confidencial, dos sitúan sus presupuestos entre 50.001 y 100.000 USD y una reporta menos de 5.000 USD. No se registran proyectos en rangos intermedios ni superiores a 100.000 USD. Esta variabilidad sugiere diferencias en el alcance de cada capacitación: mientras algunas involucran equipamiento avanzado y logística de laboratorio, probablemente justificando montos elevados, otras se enfocan en charlas teóricas o simulaciones básicas que requieren presupuestos reducidos. Asimismo, la confidencialidad de dos programas podría estar asociada a colaboraciones con empresas privadas o inversiones estratégicas en desarrollo tecnológico.

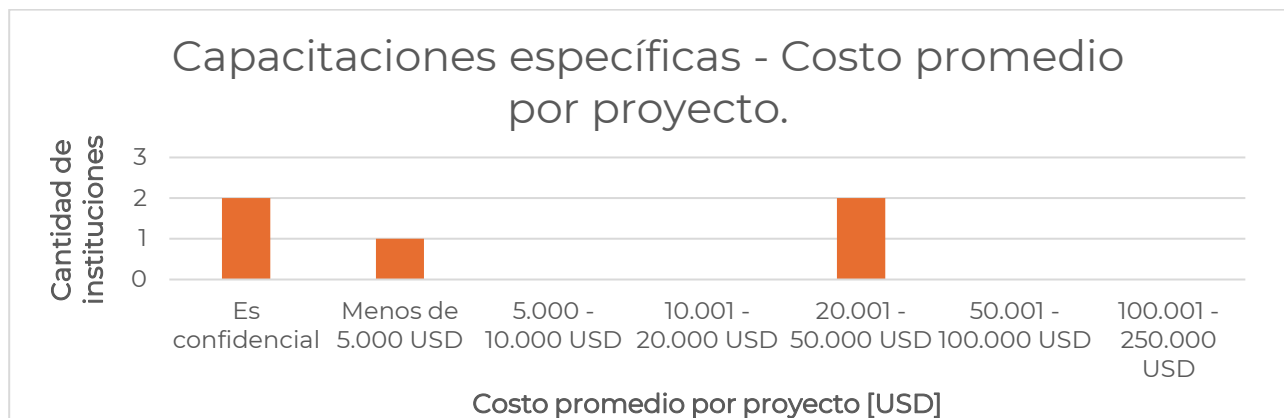


Figura N°44 Cantidad de instituciones que ofrecen capacitaciones específicas, clasificadas según el costo promedio por proyecto en USD. Respuestas 5/21.

Las capacitaciones específicas constituyen el formato predominante para formar capital humano en hidrógeno verde y derivados. Se evidencian programas de mediana duración (50-100 horas), dirigidos a participantes con formación pregrado, impartidos por equipos multidisciplinarios y diseñados para grupos de tamaño medio. Los contenidos cubren mayoritariamente tecnologías, normativas y seguridad, pero muestran brechas en formación práctica de derivados y aspectos legales. Por tanto, se recomienda incentivar la creación de capacitaciones que incluyan prácticas presenciales en infraestructura real de producción y uso de derivados, así como incorporar módulos de legislación y ética para complementar la formación técnica y asegurar una preparación integral de los profesionales del sector.

#### 4.2.4.2 Estructura financiera de los proyectos para la formación de personal

Esta sección aborda la estructura financiera de las instituciones que desarrollan actividades de formación de personal técnico y profesional vinculadas al hidrógeno verde en Chile. El objetivo es identificar las principales fuentes de financiamiento, el origen y composición de sus ingresos, y los mecanismos que permiten viabilizar el desarrollo y sostenibilidad de sus iniciativas formativas. Esta caracterización permite comprender las condiciones bajo las cuales operan estas instituciones y las capacidades que poseen para implementar, mantener y escalar programas de formación especializados en un sector estratégico.

##### 4.2.4.2.1 Financiamiento de las instituciones para formación de personal

En esta sección se describen las modalidades de financiamiento utilizadas por las instituciones de formación encuestadas, detallando los tipos de fondos a los que acceden, su origen público o privado, y las condiciones asociadas a su uso. Esta caracterización permite observar el nivel de dependencia, diversificación y estabilidad financiera con la que cuentan las instituciones para sostener sus programas vinculados al hidrógeno verde.

En la evaluación de financiamiento de las instituciones de formación de personal, se analiza tanto el monto total recaudado desde su inicio como la procedencia de estos recursos, reflejados en la *Figura N°45* y *Figura N°46* respectivamente.

En la *Figura N°45*, muestra que, en el rango de “Menos de 100.000 USD”, dos instituciones reciben financiamiento de origen nacional, mientras que una institución declara el monto de su financiamiento, pero el origen lo identifica como confidencial y otra presenta financiamiento mixto. Adicionalmente, una institución no cuenta con financiamiento. No existen instituciones que informen montos superiores a 100.000 USD, ni en las categorías intermedias (100.000 - 500.000 USD) ni en el rango alto (500.001 - 10.000.000 USD). Esto indica que la mayor parte de los centros formativos opera con presupuestos relativamente acotados, apoyados principalmente por fuentes nacionales, y que solo un par de entidades ha logrado asegurar aportes internacionales o mixtos, aunque siempre en escalas modestas.

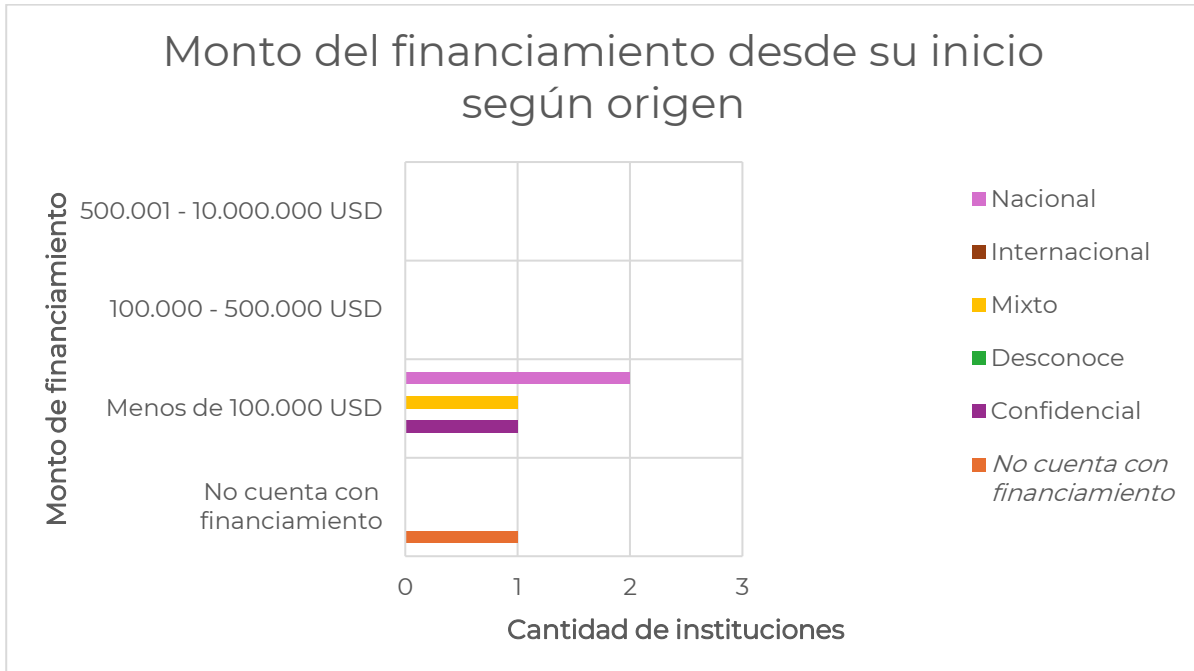


Figura N°45 Número de instituciones según el monto del financiamiento recibido desde su inicio, diferenciadas por la fuente de financiamiento. Respuestas 5/21.

La Figura N°46 desglosa el financiamiento de inicio según la fuente de los recursos. Para montos inferiores a 100.000 USD, dos instituciones dependen de fondos públicos, una de fondos privados y otra de un esquema mixto. Una institución informa no contar con financiamiento desde su creación. Al igual que en la clasificación por origen, no se registran aportes en los rangos superiores a 100.000 USD para ninguna de las categorías de fuente. Esta distribución evidencia que la mayoría de las iniciativas formativas se sostiene con recursos públicos de pequeña envergadura, complementados en algunos casos por aportes privados o combinaciones de ambos, pero sin alcanzar aún niveles de financiamiento que permitan escalar proyectos de envergadura mayor.

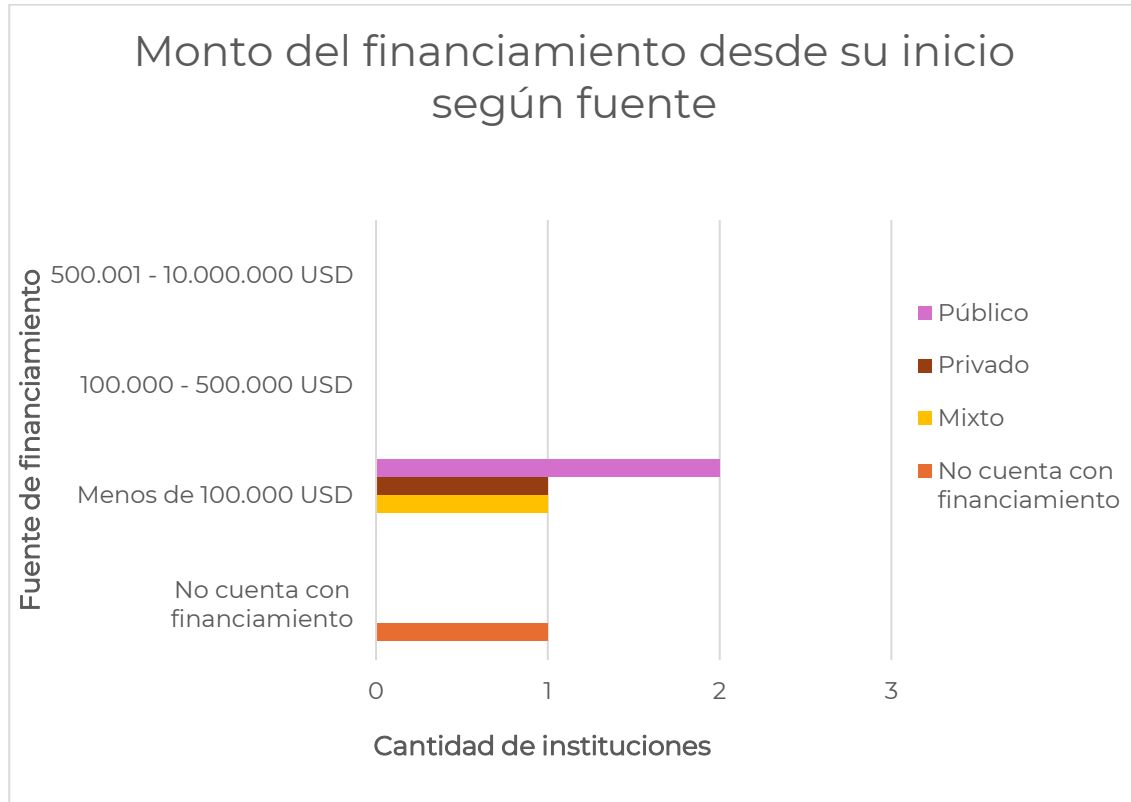


Figura N°46 Cantidad de instituciones según el rango de monto de financiamiento recibido desde su inicio. Respuestas 5/21.

Ambos análisis revelan que las instituciones de formación de personal en hidrógeno verde operan, en su mayoría, con financiamiento limitado al primer umbral de 100.000 USD y sustentado fundamentalmente por recursos nacionales y públicos. La presencia de financiamiento internacional o mixto es poco frecuente y restringida a montos bajos. Asimismo, la existencia de al menos una institución sin financiamiento pone de relieve desafíos de sostenibilidad y la necesidad de diversificar las fuentes de ingreso para ampliar la capacidad formativa, incorporar infraestructura práctica y garantizar la continuidad de programas de capacitación específicos.

#### 4.2.4.2.2 Ingresos de las instituciones para formación de personal

Se presenta una caracterización general de los ingresos percibidos por las instituciones de formación de personal participantes del estudio. Esta información permite evaluar el grado de autonomía financiera de las instituciones y su capacidad para sostener operativamente sus programas formativos a mediano y largo plazo.

En la *Figura N°47*, se detalla el monto histórico y reciente de ingresos por institución. Desde el inicio de sus actividades hasta la fecha, tres entidades informan ingresos inferiores a 100.000 USD, mientras que una institución se sitúa en el tramo de 100.001-500.000 USD, lo que indica que una de las organizaciones ha logrado superar el umbral de 100.000 USD en su trayectoria global. Para el periodo 2022-actualidad, cuatro instituciones mantienen ingresos por debajo de 100.000 USD y solo una no

reporta montos superiores a dicha cifra. En el año 2024, tres instituciones se mantienen con ingresos menores a 100.000 USD y una entidad alcanza el rango de 100.001-500.000 USD. Estos resultados muestran que, si bien la mayoría de los centros operan con presupuestos acotados, al menos una institución ha consolidado un aumento de escala en el último año, situando sus ingresos en el tramo intermedio.

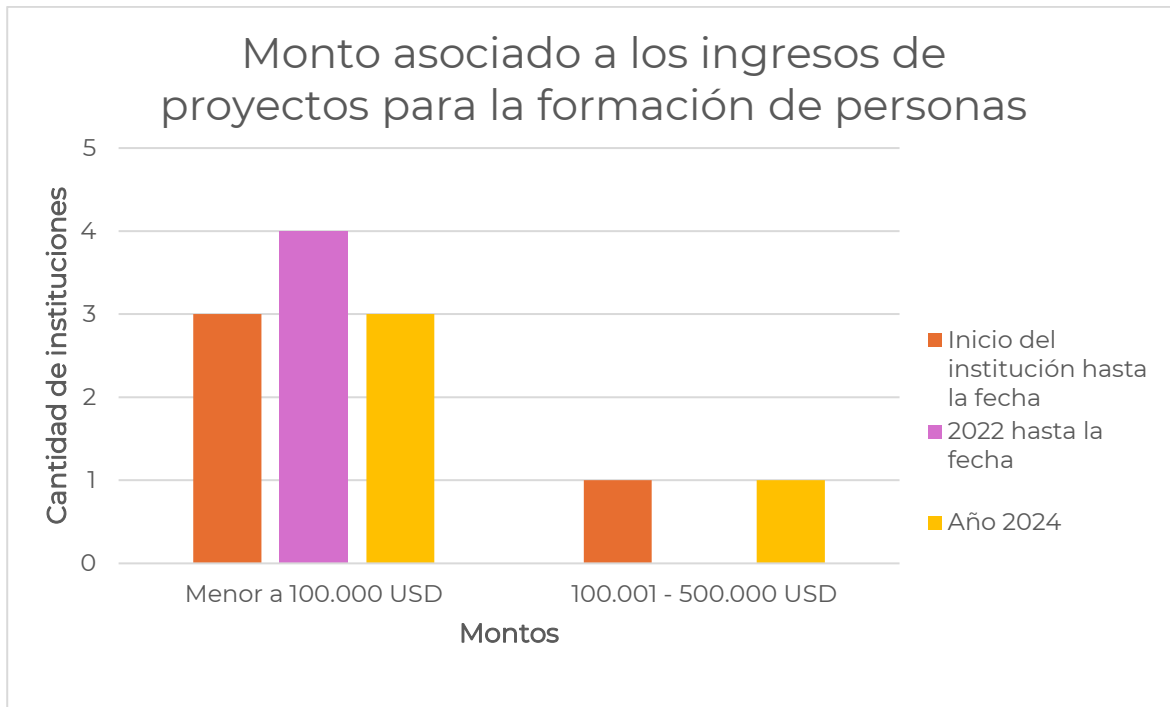


Figura N°47 Cantidad de instituciones según rangos de ingresos de sus proyectos de formación para personas. Respuestas 4/21.

La Figura N°48 evidencia que las fuentes de ingreso para los proyectos de formación de personal presentan un patrón de dependencia notable hacia fondos públicos, excepto en el caso de Institución Z. Este predominio de recursos estatales sugiere que las instituciones se respaldan mayoritariamente en convocatorias gubernamentales o programas ministeriales para sostener sus actividades formativas en torno al hidrógeno verde y sus derivados.

Esta concentración en aportes públicos, si bien garantiza un flujo estable en el corto plazo, enfrenta dos riesgos principales: uno, la vulnerabilidad a cambios en políticas de asignación presupuestaria; y dos, la limitada flexibilidad para generar contenidos innovadores que requieran inversiones adicionales fuera de los criterios de financiamiento estatal.

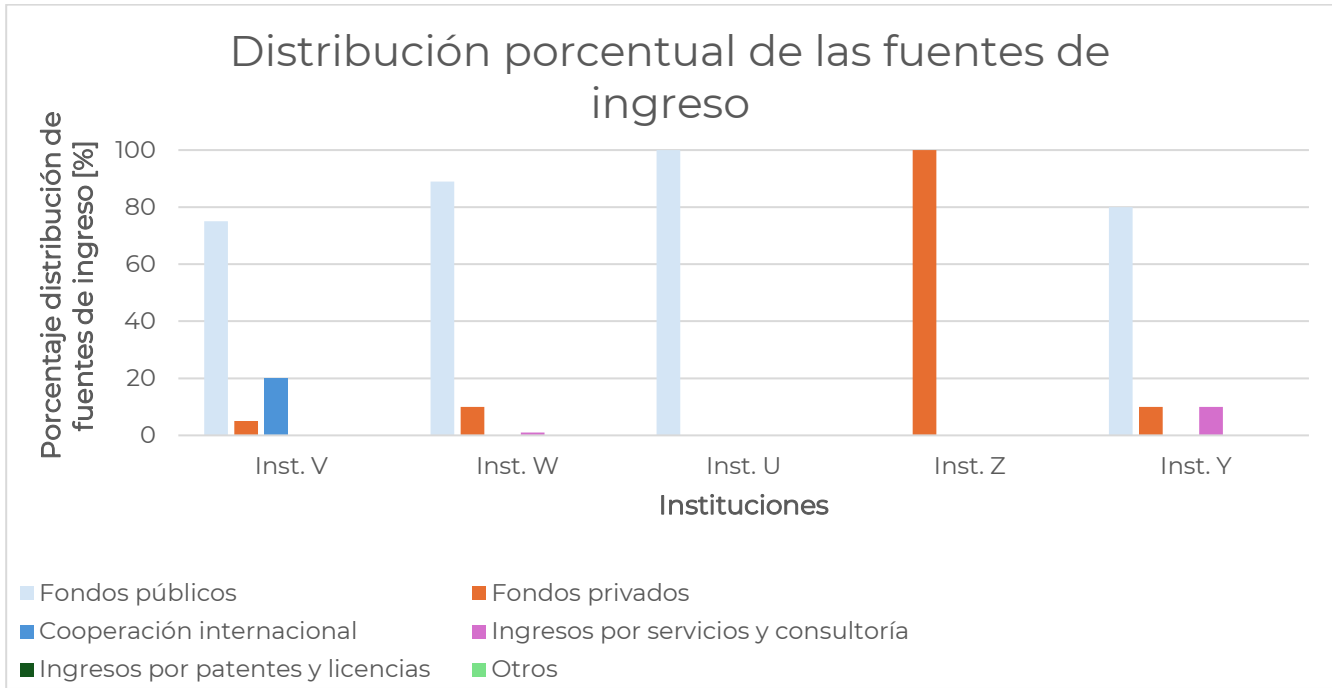


Figura N°48 Distribución porcentual de las fuentes de ingreso por institución, segmentadas según el tipo de fuente. Respuestas 5/21.

Por otra parte, el 20% de cooperación internacional que registra Institución V apunta a la existencia de convenios puntuales con agencias extranjeras o proyectos bilaterales que permiten diversificar parcialmente sus ingresos, aunque dicho porcentaje aún es bajo comparado con la proporción pública. En Institución W, el 10% de fondos privados indica que su dependencia de aportes empresariales es todavía incipiente; esta cifra podría incrementarse si se impulsan alianzas con firmas del sector energético o proveedores de tecnología de hidrógeno que requieran programas de capacitación para su personal.

El caso de Institución Z, que financia el 100% de sus proyectos con recursos privados, revela un modelo de autogestión basado en la oferta de capacitaciones de mercado, posiblemente vinculadas a la venta de cursos corporativos o a la prestación de servicios especializados para empresas. Esta ecuación les permite diseñar contenidos con mayor libertad, pero también implica asumir por completo el riesgo financiero y la demanda del mercado, sin respaldo estatal. Si bien puede traducirse en una ventaja competitiva por su agilidad para ajustar sus mallas curriculares, también los expone a fluctuaciones en la contratación de servicios de formación externa, dependiendo del contexto económico. Institución Y presenta un esquema mixto, lo cual otorga cierta resiliencia al combinar subvenciones estatales con generación de ingresos propios. Esta diversificación modesta muestra que Institución Y ya incorpora proyectos de clientela directa o consultorías técnicas, lo que podría ampliarse para reducir la exposición a recortes de presupuesto público. Al mismo tiempo, el hecho de que ninguna institución registre ingresos por patentes o licencias implica que aún no se explota el potencial de comercializar propiedad intelectual derivada de sus investigaciones en hidrógeno verde. Desarrollar estrategias para licenciar metodologías, herramientas de simulación o materiales didácticos avanzados podría abrir una vía adicional de financiamiento con márgenes de crecimiento significativo.

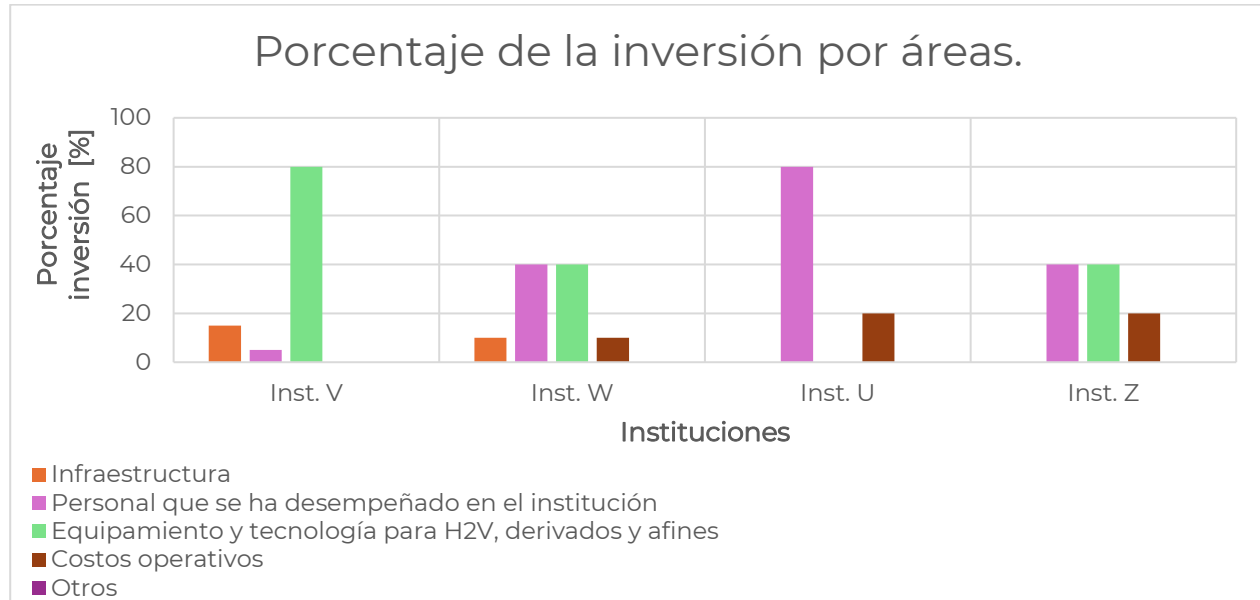
La distribución de ingresos muestra una dependencia marcada de fondos públicos, lo que garantiza estabilidad a corto plazo, pero expone a cambios presupuestarios. Se observa que algunas entidades complementan sus recursos mediante cooperación internacional o aportes provenientes del sector privado, mientras que otras dependen principalmente de financiamiento propio, lo que les otorga mayor flexibilidad operativa, aunque también una exposición más alta a las variaciones del mercado. Un grupo menor presenta esquemas mixtos que combinan fondos estatales, aportes privados y servicios o consultorías, alcanzando un nivel moderado de diversificación. Solo un número limitado de organizaciones ha logrado generar ingresos adicionales a través de consultorías o servicios especializados, y la participación de la propiedad intelectual en los ingresos continúa siendo prácticamente inexistente. En conjunto, los resultados muestran que los fondos públicos siguen siendo la principal fuente de financiamiento para las actividades de formación en hidrógeno verde. No obstante, existe un margen relevante para avanzar hacia modelos más sostenibles mediante la ampliación de alianzas con el sector privado, el fortalecimiento de la cooperación internacional y la generación de ingresos por licencias o prestación de servicios, estrategias que podrían incrementar la inversión en infraestructura, la actualización de contenidos y la expansión de la cobertura formativa.

#### 4.2.4.2.3 Inversión de las instituciones para formación de personal

Esta sección presenta los resultados obtenidos sobre la inversión realizada por las instituciones de formación en distintas áreas asociadas al desarrollo del hidrógeno verde y sus aplicaciones. A partir de la información recopilada, se identifican las proporciones relativas de inversión asignadas a infraestructura, ingeniería y diseño de instalaciones, contratación de personal, adquisición de equipamiento didáctico y tecnológico, costos operativos y otros componentes.

La *Figura N°49*, muestra la distribución porcentual de la inversión total por institución, permitiendo observar las diferencias en las prioridades de asignación de recursos. Por su parte, la *Figura N°50*, presenta el promedio general del porcentaje de inversión destinado a cada área, lo que permite identificar tendencias agregadas. En conjunto, ambas figuras ofrecen una visión comparativa sobre cómo las instituciones han destinado sus recursos económicos para fortalecer sus capacidades formativas en torno al hidrógeno verde.

Al observar cada institución por separado según la *Figura N°49*, se observa que la Institución V concentra la mayor parte de su inversión en equipamiento y tecnología para hidrógeno verde y sus derivados (80%), destinando un 15% a infraestructura y un 5% a personal. Este patrón refleja una etapa de fortalecimiento tecnológico orientada a la adquisición de capacidades materiales, más que a la expansión del equipo humano. La Institución U, en cambio, prioriza ampliamente la inversión en personal (80%), complementando con un 20% en costos operativos, lo que evidencia una estrategia centrada en consolidar equipos técnicos y docentes especializados. La Institución W muestra una distribución más equilibrada, con 40% del gasto destinado tanto a personal como a equipamiento, junto con un 10% en infraestructura y otro 10% en costos operativos, lo que sugiere una gestión que busca mantener el equilibrio entre recursos humanos y tecnológicos. Finalmente, la Institución Z presenta un esquema similar al de la Institución W, con 40% en personal, 40% en equipamiento y 20% en costos operativos, demostrando una política de inversión diversificada y sostenida. En conjunto, los datos evidencian que las instituciones tienden a priorizar la formación de capital humano y la adquisición de equipamiento por sobre el desarrollo de infraestructura, reflejando una orientación práctica hacia el fortalecimiento técnico-operativo.



*Figura N°49 Distribución porcentual de la inversión en cada institución según tipo de área. Respuestas 4/21.*

El análisis comparativo de los porcentajes invertidos por cada institución revela que la estrategia dominante se orienta a consolidar el capital humano y a equipar los laboratorios, relegando las partidas para infraestructura física y conceptos secundarios. En términos agregados según la *Figura N°50*, aproximadamente el 40% del presupuesto se destina a mantener al personal especializado que ya forma parte de la institución, mientras otro 40% se orienta a la adquisición de tecnología y equipos específicos para prácticas en hidrógeno verde y derivados. Este enfoque dual sugiere que las entidades priorizan el refuerzo de capacidades internas y el acceso a herramientas técnicas avanzadas, que son esenciales para ofrecer programas formativos de alta calidad.

La intervención mínima en infraestructura, alrededor de 5%, indica que los centros confían en las instalaciones existentes y actualmente no encuentran justificado ampliar o remodelar espacios, lo cual puede ser adecuado si las aulas y laboratorios cumplen con los requisitos. Sin embargo, esta decisión podría limitar la capacidad de escalar actividades prácticas en caso de aumento de demanda o de incorporación de nuevas tecnologías que requieran instalaciones específicas. Los costos operativos representan un 10% del total, lo que denota que las instituciones deben cubrir gastos recurrentes (como servicios, licencias de software o logística de cursos) sin que esto comprometa el grueso de la inversión.

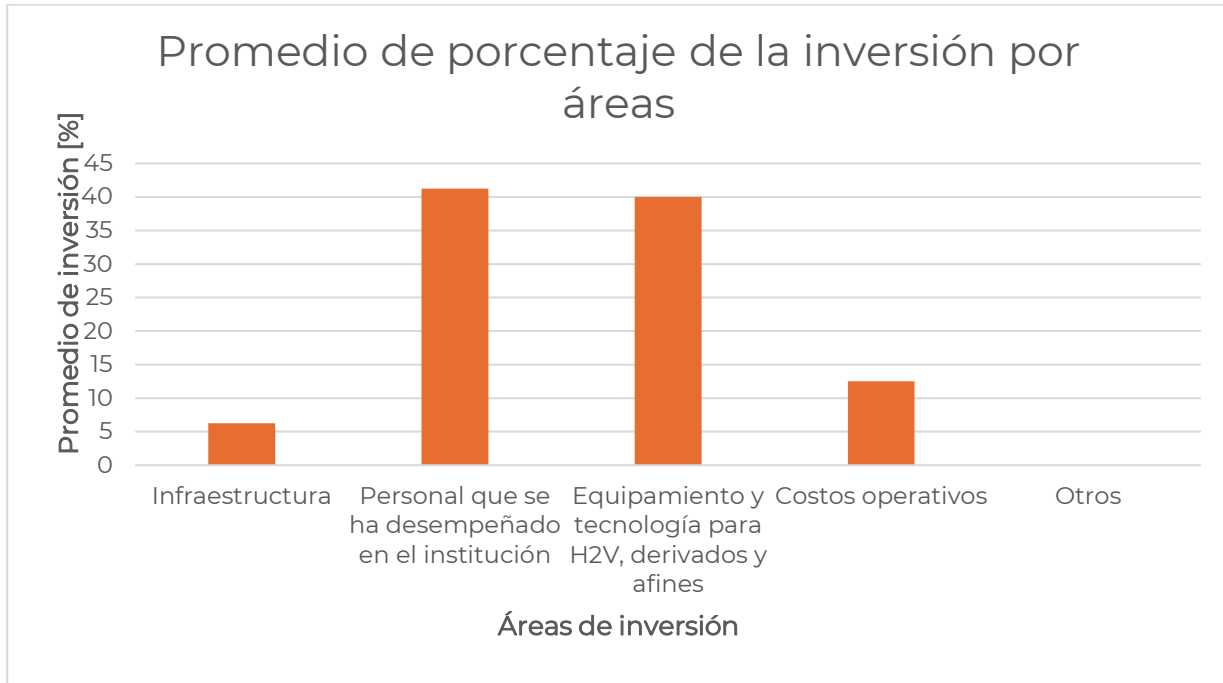


Figura N°50 Promedio del porcentaje de la inversión destinado a cada área. Respuestas 4/21.

En síntesis, el patrón de inversión detectado demuestra que las instituciones confían en sus recursos humanos existentes y en la tecnología adquirida para sustentar las capacitaciones en hidrógeno verde. No obstante, el bajo porcentaje destinado a infraestructura y la falta de partidas para iniciativas denominadas “otros” plantean la necesidad de anticipar futuras ampliaciones de laboratorios y de considerar proyectos de innovación didáctica o alianzas externas. Reorientar, al menos parcialmente, los fondos hacia la mejora de los espacios físicos y la incorporación de metodologías colaborativas podría potenciar la cobertura y la calidad de la formación, asegurando que tanto el equipamiento como el entorno de aprendizaje evolucionen al ritmo del desarrollo tecnológico.

#### 4.2.4.2.4 Financiamiento de proyecto destacado de las instituciones para formación de personal

Esta sección expone el caso del financiamiento de un proyecto formativo, declarado como destacado por la unidad informante. Se describen sus componentes financieros y las fuentes de financiamiento involucradas. Este análisis permite ilustrar, a través de un ejemplo concreto, cómo se viabilizan técnica y económicamente proyectos complejos de formación en el ámbito del hidrógeno verde, y qué aprendizajes pueden extraerse para futuras iniciativas similares.

En la Figura N°51, se observa que el proyecto destacado recibe aportes nacionales por debajo de 100.000 USD en cuatro de las cinco instituciones que informan datos sobre su origen. Una institución logra situarse en el rango de 100.000-500.000 USD gracias a recursos nacionales, mientras que solo una entidad declara financiación mixta por debajo de 100.000 USD. No se registran financiamientos exclusivamente internacionales ni casos sin financiamiento en rangos superiores. Esto sugiere que, para viabilizar un proyecto formativo de alto impacto, las instituciones tienden a depender de fondos estatales de montos moderados, complementados en ocasiones por aportes mixtos. La ausencia de financiamiento internacional en el nivel destacado indica que la gestión de recursos externos todavía

no se incorporó como estrategia prioritaria en este proyecto, lo cual deja espacio para explorar convocatorias internacionales en futuros desarrollos.

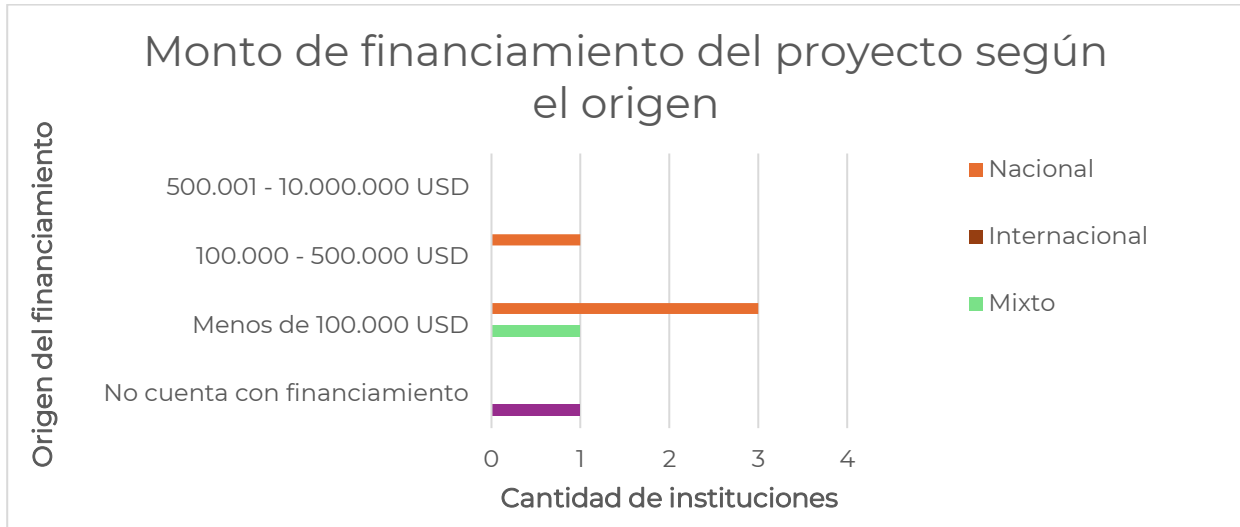


Figura N°51 Cantidad de instituciones categorizadas según el rango de monto de financiamiento de su proyecto y su origen. Respuestas 6/21.

En el Figura N°52, se observa que, de las seis instituciones que reportaron su proyecto destacado, dos cuentan con financiamiento público: una localizada en el rango de 100.000-500.000 USD y otra en el tramo de menos de 100.000 USD. Esto refleja que los fondos estatales respaldan tanto iniciativas de mayor envergadura como proyectos de menor escala, demostrando flexibilidad en los programas de financiamiento gubernamental.

En cuanto al financiamiento privado, también aparecen dos instituciones cuyos aportes se sitúan por debajo de 100.000 USD. Esta presencia de recursos privados en el mismo umbral indica que las empresas o inversionistas externos contribuyen de manera complementaria, aunque aún en montos modestos (para el contexto del hidrógeno verde), lo cual puede responder a la fase inicial de desarrollo de estas colaboraciones. Asimismo, una institución cuenta con financiamiento mixto (combinación de fuentes públicas y privadas) por debajo de 100.000 USD, lo que sugiere un esfuerzo conjunto para sumar recursos de distintos orígenes y aumentar la viabilidad del proyecto sin depender exclusivamente de un solo tipo de aporte.

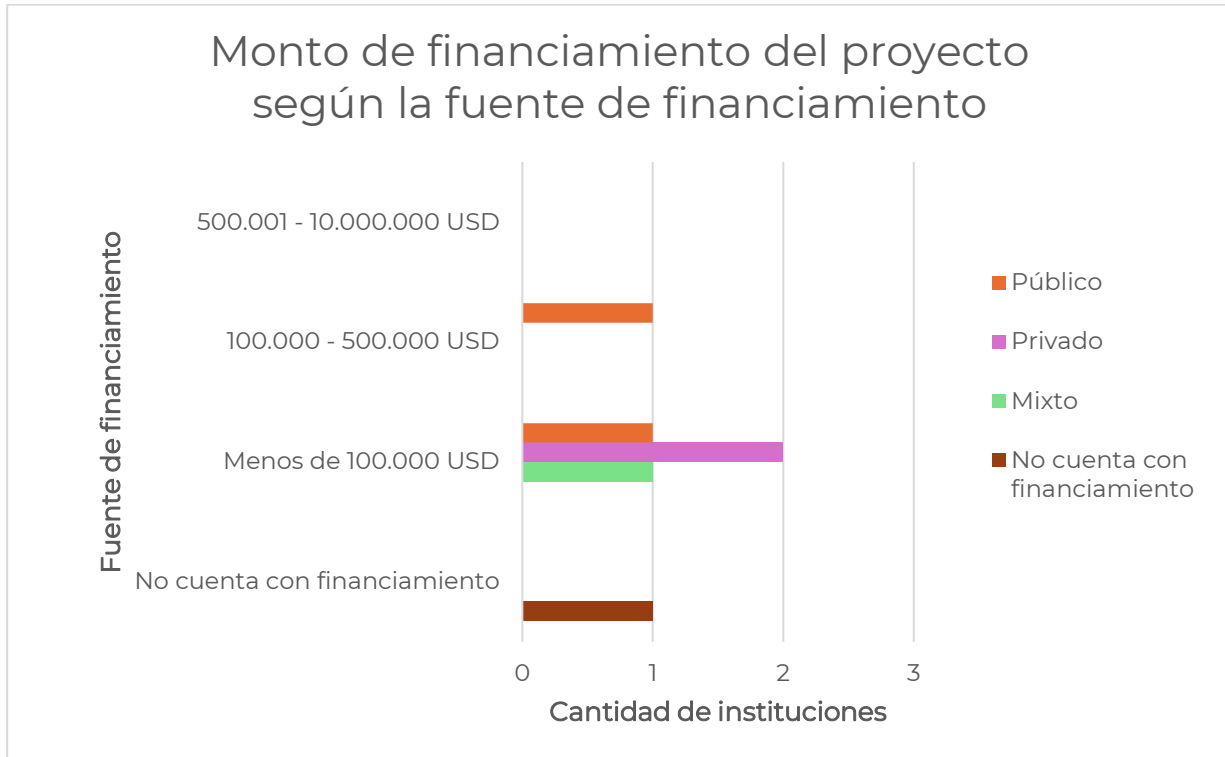


Figura N°52 Cantidad de instituciones según el rango de monto de financiamiento de su proyecto y según la fuente de financiamiento. Respuestas 6/21.

Finalmente, un proyecto no cuenta con financiamiento, lo que evidencia que existe al menos un caso en que el desarrollo formativo se lleva a cabo con recursos propios o con aportes no monetarios, por ejemplo, la dedicación de personal interno o infraestructura ya disponible. Esta situación permite identificar un riesgo de falta de sostenibilidad financiera si no se logran asegurar fondos en el futuro.

En conjunto, el análisis muestra que la mayoría de los proyectos destacados se financian con montos inferiores a 100.000 USD, ya sea mediante fondos públicos, aportes privados o esquemas mixtos, mientras que solo una institución ha logrado un financiamiento público de mayor escala (100.000-500.000 USD). Esto revela que, aunque existe diversidad de fuentes, los proyectos de formación en hidrógeno verde operan en un rango financiero acotado. Para fortalecer iniciativas futuras, resultaría recomendable buscar aumentar la participación de financiamiento privado e internacional y promover estrategias mixtas que permitan elevar los montos disponibles y garantizar la continuidad de los programas.

#### 4.2.5 Proyecto destacado de instituciones para la formación de personal

Esta sección presenta una selección de proyectos que las instituciones nacionales de formación han identificado como iniciativas destacadas en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados. Se incluyen experiencias que, por su enfoque técnico, nivel de implementación o grado de vinculación con el sector productivo, representan avances relevantes en la preparación de capital humano para esta industria emergente. La información expuesta considera antecedentes específicos de cada proyecto,

tales como objetivos, componentes formativos, colaboraciones estratégicas y tecnologías abordadas. Este levantamiento permite visibilizar buenas prácticas y referentes que pueden servir de base para futuras acciones de fortalecimiento institucional. A continuación, en la *Tabla N°12*, se presentan los proyectos destacados por cada una de las instituciones de formación participantes.

*Tabla N°12 Proyecto destacado de las instituciones de formación de personal con temporalidad de inicio y término del proyecto, indicando además si el proyecto está o no finalizado. Instituciones 6*

Institución	Título del proyecto	Inicio del proyecto	Término del proyecto	Proyecto finalizado
Inst. V	The summer school	1er semestre 2024	1er semestre 2025	Sí
Inst. W	Hidrógeno como vector energético en la industria local.	2do semestre 2024	1er semestre 2025	No
Inst. X	Curso Hidrógeno Verde ¿El energético del Futuro?	-	-	No
Inst. U	Capacitación avanzada: Normativa y seguridad	1er semestre 2024	1er semestre 2024	Sí
Inst. Z	Reconversión laboral	1er semestre 2023	2do semestre 2024	Sí
Inst. Y	Diplomado en Hidrógeno Solar	2do semestre 2024	2do semestre 2025	No

Como se aprecia en la Tabla N°13, los proyectos destacan por su énfasis en la aplicación práctica de conocimientos; Institución X e Institución V incorporan laboratorios para que los participantes experimenten directamente con tecnologías de celdas de combustible y electrólisis, mientras que Institución U e Institución Z centran sus contenidos en normativas y protocolos de seguridad. Institución W, por su parte, se enfoca en la capacitación presencial a través de módulos que permiten cubrir desde el diagnóstico inicial hasta la evaluación final, aunque no detalla actividades de laboratorio específicas. Institución Y ofrece un diplomado integral que recorre desde la generación de hidrógeno solar hasta sus aplicaciones en minería, e incluye fundamentos de economía circular e innovación para complementar la formación técnica.

*Tabla N°13 Objetivo y descripción del proyecto destacado de cada institución de formación de personal encuestada. Instituciones 6.*

Institución	Título del proyecto	Objetivo principal	Descripción
Institución V	The summer school	Fortalecer sinergias entre Chile y Alemania en investigación en hidrógeno verde	Actividades de una semana con la Universidad de KIT y otras universidades nacionales, para intercambio de información entre estudiantes de post grado y proyectos de hidrógeno verde
Institución W	Hidrógeno como vector energético en la industria local.	Diseñar y ejecutar un programa de traspaso de conocimientos de tecnologías de producción y sus aplicaciones de hidrógeno verde y sostenibilidad. El programa contribuirá a la formación de	Con la creciente importancia del hidrógeno verde en Chile y en todo el mundo, existe una necesidad creciente de profesionales capacitados en esta área. Para lograr atender esta necesidad de conocimiento, se propone un programa de formación desarrollado en 6 módulos con un total

		capital humano que se espera se constituya de forma integral en estas temáticas y sean parte de la cadena de valor proyectada. El programa contemplará la participación de un mínimo de 30 personas emprendedores, profesionales de consultoras, incubadoras y aceleradoras especializadas, profesionales de organismos públicos y empresas, todos actores del ecosistema de innovación en hidrógeno verde en la región	de 40 horas lectivas presenciales. El programa se trabajará en tres etapas: 1) Desarrollo de convocatoria, selección de beneficiarios y diagnóstico. 2) Inicio del programa de formación con evento de lanzamiento y cierre masivo. 3) Evaluación del proceso de incorporación de conocimientos, así como satisfacción de los beneficiarios. Todo este programa será certificado por la USM, manteniendo el sello de calidad que distingue a la Universidad y sus relatores. Además, se cuenta como coejecutor a Renova Energías, empresa con experiencia en el desarrollo, asesoría e inversión en proyectos de sustentabilidad, destacando proyectos en energías renovables.
Institución X	Curso Hidrógeno Verde ¿El energético del Futuro?	El objetivo es que al finalizar el curso los participantes sean capaces de Conocer las ventajas y los procesos tecnológicos que involucra la cadena de valor del Hidrógeno Verde como vector energético en Chile, con el fin de entender la aplicación de esta tecnología a nivel local.	Fue el primer curso de hidrógeno en Chile, se ha dictado 8 veces desde el año 2021. Es un curso que aborda toda la cadena de valor del hidrógeno, se compone de 10 módulos que son: Módulo 1: El hidrógeno verde: Potencial y beneficios para Chile (1,5 horas). Módulo 2: Generación de hidrógeno (2 horas). Módulo 3: Celdas de Combustible (Fuel Cell) y proyectos Power to Power (p2p) (2 horas). Módulo 4: Laboratorio (1 hora). Módulo 5: Almacenamiento de hidrógeno (1,5 horas). Módulo 6: Transporte de H2 (1,5 horas). Módulo 7: El hidrógeno y la seguridad (1,5 horas). Módulo 8: Normativa en Chile (1,5 horas). Módulo 9: Proyectos de aplicación de Hidrógeno Verde (3 horas). - Invitados módulo: 2 proyectos en carpeta/desarrollo en Chile Módulo 10: Introducción a la evaluación técnica y económica de proyectos de H2 verde (3,5 horas).
Institución U	Capacitación avanzada: Normativa y seguridad	Dar a conocer los elementos principales actuales y relevantes para la industria local sobre normativa y seguridad	Panorama general sobre normativa aplicable a proyectos de generación y aplicaciones de hidrógeno, además de condiciones de seguridad para proyectos.
Institución Z	Reconversión laboral	Reconvertir a personal de plantas térmicas a proyectos de hidrógeno verde	Entregar las competencias para Diseñar plantas de hidrógeno verde, desarrollo de estos y conceptos de operación y mantenimiento.
Institución Y	Diplomado en Hidrógeno Solar	Proporcionar conocimientos y herramientas técnicas básicas que permitan comprender los aspectos fundamentales del mercado eléctrico, la política energética nacional, y la demanda del sector minero. A través del programa, los participantes adquirirán un entendimiento integral de las fuentes de generación de energía, los procesos de generación, almacenamiento y usos del hidrógeno, así como de los combustibles sintéticos.	El Diplomado en Hidrógeno Solar está dirigido a profesionales que deseen especializarse en el desarrollo de habilidades para transferir conocimientos técnicos especializados en la cadena de valor de la industria de generación, almacenamiento y uso del Hidrógeno verde, con enfoque en condiciones locales y la elaboración de proyectos. El diplomado está enfocado a personas especialistas en el sector energético; proveedores y clientes de empresas del área; empresarios interesados en explorar y desarrollar proyectos de hidrógeno verde; y todos aquellos profesionales que buscan adquirir conocimientos sobre la industria de la energía y la descarbonización de estas mismas.

Todas las iniciativas destacan por su carácter colaborativo y por la participación de múltiples actores. La Summer School organizada por la Institución V articula un intercambio académico entre universidades nacionales y alemanas, promoviendo la cooperación científica internacional. La Institución W desarrolla su programa en alianza con empresas del sector energético y universidades,

asegurando la certificación de contenidos y la pertinencia técnica de la formación. La Institución X incorpora expertos que lideran proyectos nacionales de hidrógeno, fortaleciendo la conexión entre la academia y la industria. La Institución U mantiene vínculos con organismos reguladores para asegurar la homologación de estándares y buenas prácticas de seguridad. La Institución Z colabora con laboratorios internacionales y empresas del sector eléctrico, integrando conocimiento aplicado y experiencia operativa. Finalmente, la Institución Y establece alianzas con consultoras e incubadoras de emprendimientos, fomentando el enfoque de innovación y transferencia tecnológica. En conjunto, estas experiencias reflejan un entendimiento compartido: la formación en hidrógeno verde requiere articulación entre universidades, industria, organismos públicos y actores internacionales para consolidar un ecosistema de aprendizaje y desarrollo sostenible.

Aunque los programas cubren un amplio espectro de contenidos, se identifican áreas con menor protagonismo. Ninguno de los objetivos profundiza en la propiedad intelectual ni en la transferencia tecnológica formal. El diplomado de Institución Y abarca innovación abierta pero no menciona esquemas de licenciamiento o patentamiento de desarrollos. En Institución W e Institución X, el enfoque recae en capacitación técnica y de formadores, sin incorporar directamente criterios de comercialización de prototipos o generación de *spin-off*. Esto constituye una oportunidad para incorporar al futuro programas que incluyan módulos sobre protección de *know-how* y modelos de negocio vinculados al hidrógeno, de modo de cerrar la brecha entre la formación técnica y el emprendimiento.

Otra brecha es la limitada representación de disciplinas económicas y de análisis de ciclo de vida. Distintos proyectos ofrecen introducciones superficiales a economía o normativa, pero ningún programa explora en detalle metodologías de evaluación de ciclo de vida y valoración de externalidades ambientales. Dado que el hidrógeno verde se promueve como alternativa sustentable, resulta relevante incluir análisis de impacto ambiental y criterios de sostenibilidad financiera para complementar la formación en aspectos puramente técnicos.

Se identifica que los proyectos incorporan la necesidad de involucrar a actores estratégicos como universidades, proveedores de tecnología, organismos públicos y empresas. Este patrón sugiere la creación de instancias periódicas de intercambio de buenas prácticas, en las que cada Institución Y ponga avances en equipamiento, experiencias de laboratorio y resultados de empleabilidad. De este modo se fomentaría la estandarización de contenidos, se compartirían recursos técnicos y se generarían sinergias que contribuyan a fortalecer el ecosistema nacional de formación en hidrógeno verde.

Los objetivos y descripciones de los proyectos destacados reflejan un esfuerzo conjunto por desarrollar capital humano especializado en hidrógeno verde mediante metodologías prácticas, modulares y colaborativas. Sin embargo, persisten brechas en materia de propiedad intelectual, análisis de ciclo de vida y seguimiento de empleabilidad. Para abordar estos desafíos es posible alinear contenidos comunes entre iniciativas, compartir recursos y crear módulos complementarios que integren economía circular, protección de innovación y evaluación de impactos. Estos pasos permitirán potenciar el impacto de cada proyecto, mejorar la calidad de la formación y acelerar la creación de un mercado laboral robusto en torno al hidrógeno verde.

Se observa en la *Figura N°53*, que cada institución aborda de manera casi integral los distintos enfoques formativos necesarios para el desarrollo del hidrógeno verde: desde tecnologías y seguridad hasta normativas, derivados, legislación, economía, gestión de proyectos, operación y mantenimiento. Este reparto equitativo de prioridades refuerza la idea de que los proyectos destacados no solo buscan

capacitar en un tema aislado, sino generar perfiles multidisciplinarios capaces de entender el ecosistema completo.

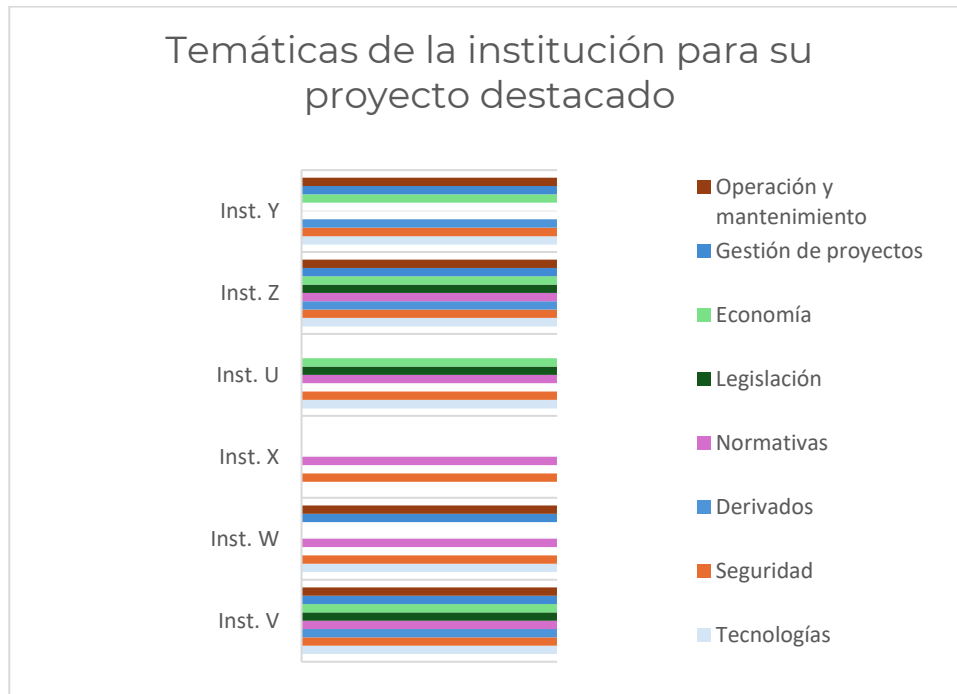


Figura N°53 Temáticas consideradas por cada Institución en su proyecto destacado, representadas mediante barras codificadas por enfoque. Respuestas 6/21.

Al vincular este resultado con el análisis anterior, queda claro que la inclusión de actores estratégicos, como universidades, proveedores tecnológicos, organismos públicos y empresas, resulta esencial para cubrir todos esos enfoques simultáneamente. La oferta de contenidos que recorre desde conceptos técnicos hasta aspectos regulatorios o de economía circular sólo se sostiene si existen instancias periódicas donde las instituciones muestren avances en equipamiento, compartan experiencias de laboratorio y presenten métricas de empleabilidad. Estas reuniones de intercambio de buenas prácticas permitirían, por un lado, estandarizar contenidos y, por otro, optimizar el uso de recursos técnicos, de manera que cada módulo formativo sea comparable en calidad y alcance.

A continuación, se presenta la *Tabla N°14*, que contiene los resultados obtenidos o esperados de los distintos proyectos destacados de cada Institución de formación que participó en este estudio.

Tabla N°14 Resultados obtenidos del proyecto destacado de hidrógeno verde. Instituciones 6.

Institución	Título del proyecto	Resultados obtenidos
Institución V	The summer school	Formación de red de cooperación entre UMAG-U de Chile- KIT- ISCI - SERC
Institución W	Hidrógeno como vector energético en la industria local.	Se espera certificar al menos el 90% de los participantes en tecnologías para la cadena de valor del hidrógeno verde.
Institución X	Curso Hidrógeno Verde ¿El energético del Futuro?	Se espera seguir capacitando personas de habla hispana en temáticas relevantes respecto al hidrógeno
Institución U	Capacitación avanzada: Normativa y seguridad	personal capacitada con información práctica y actualizada
Institución Z	Reconversión laboral	Capacitar personas
Institución Y	Diplomado en Hidrógeno Solar	(1) Capacidad para realizar investigaciones avanzadas, analizar datos y desarrollar soluciones innovadoras en el campo del hidrógeno solar. (2) Habilidad para colaborar eficazmente en equipos multidisciplinarios, así como comunicarse claramente con colegas y stakeholders. (3) Orientación a Resultados: Enfoque en la resolución de problemas, con una mentalidad orientada a objetivos y resultados concretos.

El contenido de la tabla evidencia que los proyectos de formación analizados persiguen metas que trascienden la simple transmisión de conocimientos, orientándose hacia resultados de mayor alcance, como la creación de redes de cooperación, la certificación masiva, la expansión territorial, la capacitación práctica, la reconversión laboral y el desarrollo de competencias avanzadas. En uno de los casos, la articulación de una red de colaboración entre universidades y centros de investigación refleja una estrategia orientada a la sostenibilidad de los esfuerzos formativos en hidrógeno verde, enfocándose no solo en la ejecución de un curso puntual, sino en la consolidación de alianzas académicas y científicas duraderas. Este enfoque apunta a la construcción de un ecosistema colaborativo que, en el mediano plazo, facilite el uso compartido de infraestructura, el desarrollo de proyectos conjuntos y la movilización de financiamiento internacional.

En conjunto, la comparación de resultados muestra diferentes niveles de madurez y concreción. Algunos programas establecen métricas claras, como tasas de certificación o número de beneficiarios, mientras otros priorizan la creación de redes o la definición de objetivos amplios vinculados al desarrollo de capital humano y la innovación. Existen proyectos que combinan componentes prácticos y pedagógicos con estrategias de continuidad institucional, mientras que otros avanzan hacia la formación de investigadores y líderes técnicos, evidenciando una evolución progresiva en la especialización y profundidad de las iniciativas formativas en torno al hidrógeno verde.

En definitiva, el análisis sugiere que la fuerza del ecosistema formativo radica en su diversidad de enfoques y resultados. Sin embargo, fortalecer la definición de metas, incorporar indicadores de empleabilidad y fomentar mecanismos formales de intercambio de buenas prácticas permitirá hacer más coherente la oferta y maximizar el impacto de cada proyecto en el mercado de hidrógeno verde.

#### 4.2.6 Proyecciones de instituciones para formación de personal para el año 2030

Esta sección presenta las proyecciones declaradas por las instituciones nacionales dedicadas a la formación de personal técnico y profesional respecto a su participación en la industria del hidrógeno verde hacia el año 2030. El análisis considera estimaciones sobre la ampliación de su oferta formativa,

la incorporación de nuevas tecnologías en los planes de estudio, el desarrollo de programas especializados y el fortalecimiento de capacidades prácticas. Estas proyecciones permiten identificar el nivel de preparación y compromiso de las instituciones con el desarrollo de capital humano calificado, elemento clave para acompañar el escalamiento de la industria del hidrógeno en Chile y responder a los desafíos que plantea una transición energética sostenible.

En la *Tabla N°15*, se identifica que los desafíos trazados para 2030 revelan tres grandes líneas de acción que se repiten a lo largo de los proyectos: asegurar infraestructura y recursos financieros, consolidar redes de colaboración y atraer talento especializado, y mantener la relevancia de la oferta formativa frente a cambios tecnológicos y de mercado.

*Tabla N°15 Principales desafíos que considera la institución para el año 2030.*

Institución	Título del proyecto	Desafíos identificados para 2030
Institución V	The summer school	1. Implementación de equipamiento de enseñanza e investigación 2. fortalecer redes de cooperación 3. atracción de capital humano avanzado
Institución W	Hidrógeno como vector energético en la industria local.	Establecer un diplomado o curso de posgrado en la Universidad Técnica Federico Santa María
Institución X	Curso Hidrógeno Verde ¿El energético del Futuro?	Contar con financiamiento estable o con alguna alianza con una entidad que cuente con financiamiento para apoyarlos en el diseño y ejecución de cursos de formación especializada
Institución U	Capacitación avanzada: Normativa y seguridad	Presupuesto e interesados (estabilidad del mercado y rentabilidad del hidrógeno)
Institución Z	Reconversión laboral	La reconversión laboral tiene un límite que se alcanza una vez que se reconvirtieron todas las personas que se verán afectadas por la descarbonización. La necesidad de capacitación en hidrógeno verde y derivados es sensible a que tan rápido disminuyan los precios de generación de hidrógeno utilizando energías renovables y que se pueda desarrollar la industria
Institución Y	Diplomado en Hidrógeno Solar	(1) Adaptar y actualizar continuamente la oferta formativa frente a la rápida evolución tecnológica y regulatoria del hidrógeno verde. (2) Atraer, formar y retener capital humano avanzado y multidisciplinario en un contexto de alta demanda nacional e internacional. (3) Fortalecer la vinculación con la industria y asegurar la transferencia efectiva de conocimientos y tecnologías a nivel regional. (4) Garantizar financiamiento sostenible para investigación, innovación y formación continua. (5) Promover la inclusión y diversidad en la formación de talento humano para el sector energético.

En el ámbito de infraestructura y equipamiento, Institución V apunta a implementar laboratorios y equipos tanto para enseñanza como para investigación, e Institución X e Institución U destacan la necesidad de contar con financiamiento estable que permita diseñar y ejecutar cursos especializados. Estas carencias reflejan que, las instituciones deben planificar no solo la adquisición inicial de tecnología, sino también su mantenimiento y renovación constante. Sin espacios adecuados y recursos garantizados, cualquier programa de formación corre el riesgo de quedar obsoleto o de no satisfacer la demanda práctica de la industria.

La segunda línea se centra en tejer redes y atraer capital humano avanzado. Institución V e Institución Y subrayan la importancia de fortalecer alianzas con universidades, centros de investigación y la

industria local. En su conjunto, estos proyectos entienden que la solidez de la oferta formativa depende de núcleos colaborativos donde se comparten conocimientos, se desarrollan proyectos conjuntos y se generan oportunidades de intercambio internacional. Institución Z, por ejemplo, señala que la reconversión laboral alcanzará un techo una vez que se capacite a la fuerza de trabajo actual, por lo que atraer nuevos perfiles va a ser vital para sostener la actividad formativa en el mediano plazo.

Finalmente, aparece la urgencia de adaptar contenidos y estructuras a la evolución tecnológica, regulatoria y de mercado. Institución Y describe la necesidad de actualizar continuamente su diplomado para seguir el ritmo de nuevas normativas y avances en hidrógeno solar. Institución U menciona la inestabilidad del mercado y la rentabilidad del hidrógeno como factores que incidirán en el presupuesto y en el interés de los profesionales. De igual modo, Institución W reconoce que, para 2030, será indispensable contar con un diplomado o curso de posgrado institucional que formalice la capacitación a nivel universitario. Estos retos implican que las instituciones no solo entreguen formación técnica, sino que también monitoreen tendencias globales, adapten rápidamente sus mallas curriculares y evalúen la viabilidad de nuevas materias.

## 4.3 Personal de los centros

### 4.3.1 Personal de los centros I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del personal que participa en las actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en las instituciones analizadas, considerando tanto su distribución por tipo de función como su nivel de formación y participación en procesos asociados al hidrógeno verde y sus derivados.

Se destaca, en primer lugar, el rol del personal investigador, responsable de la creación de nuevo conocimiento, la dirección de proyectos y el diseño de soluciones tecnológicas. Su labor constituye el eje central de las capacidades de I+D+i del país. Junto a ellos, el personal técnico y de apoyo que incluye operadores y mantenedores de equipamiento especializado cumple funciones clave para la implementación práctica de la investigación, asegurando la operatividad y seguridad de las instalaciones.

Dentro de la *Figura N°54*, se identifican tres bloques según el tamaño de sus equipos: 7 centros operan con cinco personas o menos, lo que refleja estructuras muy acotadas orientadas a tareas muy específicas o pilotos de investigación; otros 5 cuentan con entre 6 y 15 profesionales, lo que les permite asumir proyectos de complejidad intermedia pero aún exige colaboraciones externas para cubrir ciertas especialidades; y solo 2 instituciones disponen de más de 15 integrantes, convirtiéndose en los únicos nodos medianamente autosuficientes para coordinar múltiples líneas de investigación y desarrollo internas. En síntesis, predominan las entidades de pequeña escala, lo que obliga a gran parte del ecosistema a recurrir a alianzas puntuales o subcontrataciones para abordar fases técnicas que no pueden resolver con sus propios recursos.

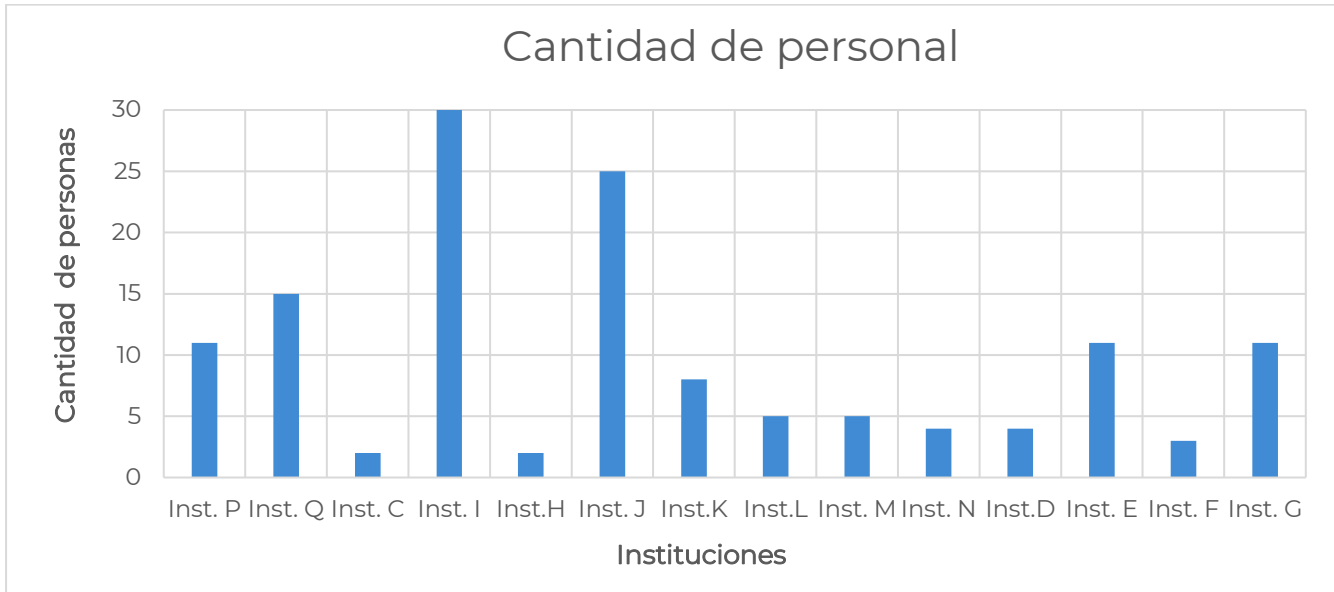
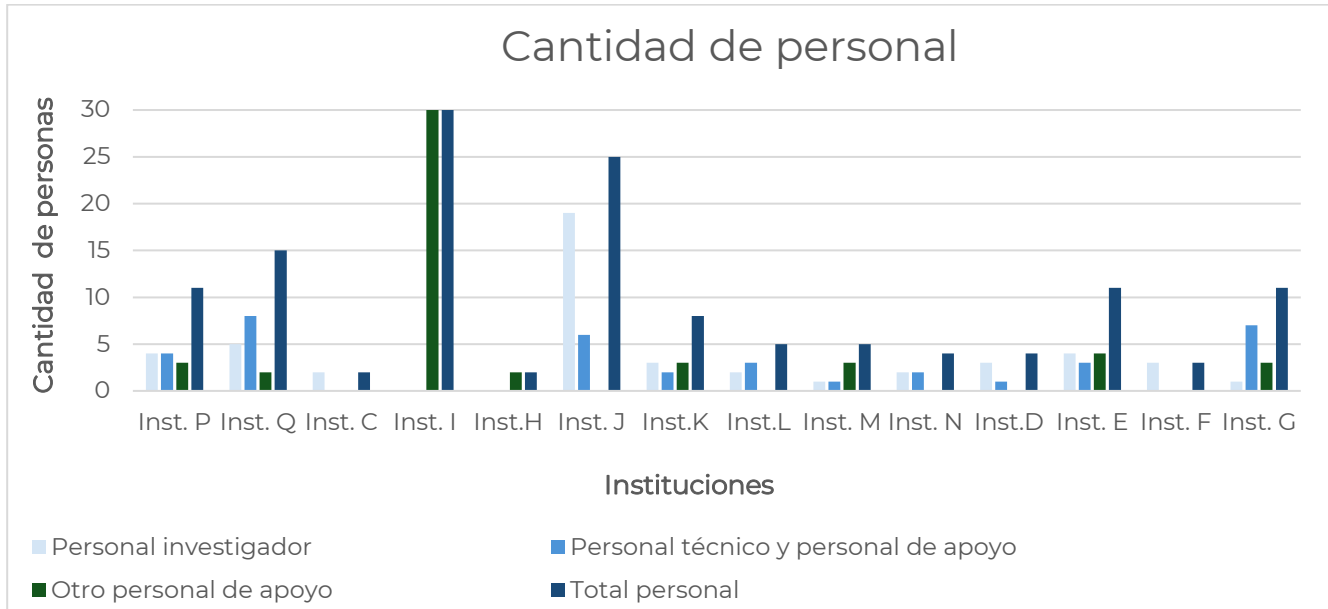


Figura N°54 Cantidad total de personal que participa en actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en cada institución, incluyendo tanto investigadores como personal técnico y de apoyo. Respuestas 14/21.

En la *Figura N°55*, se analiza la distribución total del personal dedicado a actividades relacionadas con el hidrógeno verde, observándose una alta concentración en una sola entidad que reúne cerca de la mitad del personal investigador del país, lo que evidencia su rol como actor principal en materia de I+D. En contraste, otras organizaciones muestran estructuras más acotadas o dependen en mayor medida de la contratación de capacidades técnicas externas para el desarrollo de sus proyectos.

El número elevado de técnicos en algunas entidades sugiere una orientación práctica y aplicada, que, al combinarse con equipos de investigación consolidados, permite la ejecución de proyectos piloto y actividades de validación tecnológica. En cambio, otras instituciones presentan una distribución más equilibrada entre personal investigador y técnico, mientras que algunas se especializan en áreas específicas, operando con equipos más reducidos y focalizados.

El análisis del personal de apoyo muestra diferencias notables: ciertos organismos concentran un número considerable de gestores y coordinadores, reflejando un modelo de operación centrado en la administración de proyectos y la articulación interinstitucional, mientras que otros mantienen estructuras administrativas más livianas. En conjunto, la información evidencia un ecosistema diversificado, donde unos pocos actores sostienen la mayor parte del esfuerzo en I+D, varios de tamaño medio combinan funciones técnicas y científicas, y otros optan por modelos basados en colaboración o apoyo externo para avanzar en la agenda nacional de hidrógeno verde.



*Figura N°55 Distribución del personal por tipo de función (investigador, técnico y de apoyo, otro personal de apoyo) en cada institución, mostrando el número de personas dedicadas a actividades de I+D+i en hidrógeno verde. Respuestas 14/21.*

En la *Figura N°56*, se presenta la distribución entre personal interno y personal externo para cada institución. En términos generales, la mayoría de las instituciones muestra un porcentaje muy alto de personal interno, lo que indica que privilegian la formación y retención de competencias propias. Al contar con más investigadores y técnicos contratados directamente, estas organizaciones aseguran un flujo continuo de conocimiento tácito, facilitan la comunicación interna y mantienen a su equipo alineado con los objetivos estratégicos a largo plazo. Esta estrategia también favorece una menor dependencia de consultorías externas y suele traducirse en una mayor confianza en la capacidad de sus recursos humanos para llevar adelante proyectos innovadores sin interrupciones por rotación de contratos o diferencias en metodologías de trabajo.

No obstante, la figura también revela algunas excepciones notables. Centro 10, por ejemplo, recurre en torno al 80% a colaboradores externos, lo que refleja un modelo más abierto y flexible: para tareas puntuales o muy especializadas, prefieren integrar expertos ajenos antes que formar internamente esas habilidades. De manera similar, instituciones como Centro 5 y Centro 6 combinan un porcentaje relevante de externos, equilibrio que les permite acelerar la ejecución de proyectos y acceder a conocimiento específico sin sacrificar completamente la coherencia interna. En definitiva, el predominio del personal interno refleja un enfoque orientado a la autonomía y a la consolidación de capacidades permanentes, mientras que la minoría de institutos que utilizan más personal externo responde a la urgencia de incorporar experiencia especializada y complementar las competencias internas en etapas críticas del desarrollo del hidrógeno verde.

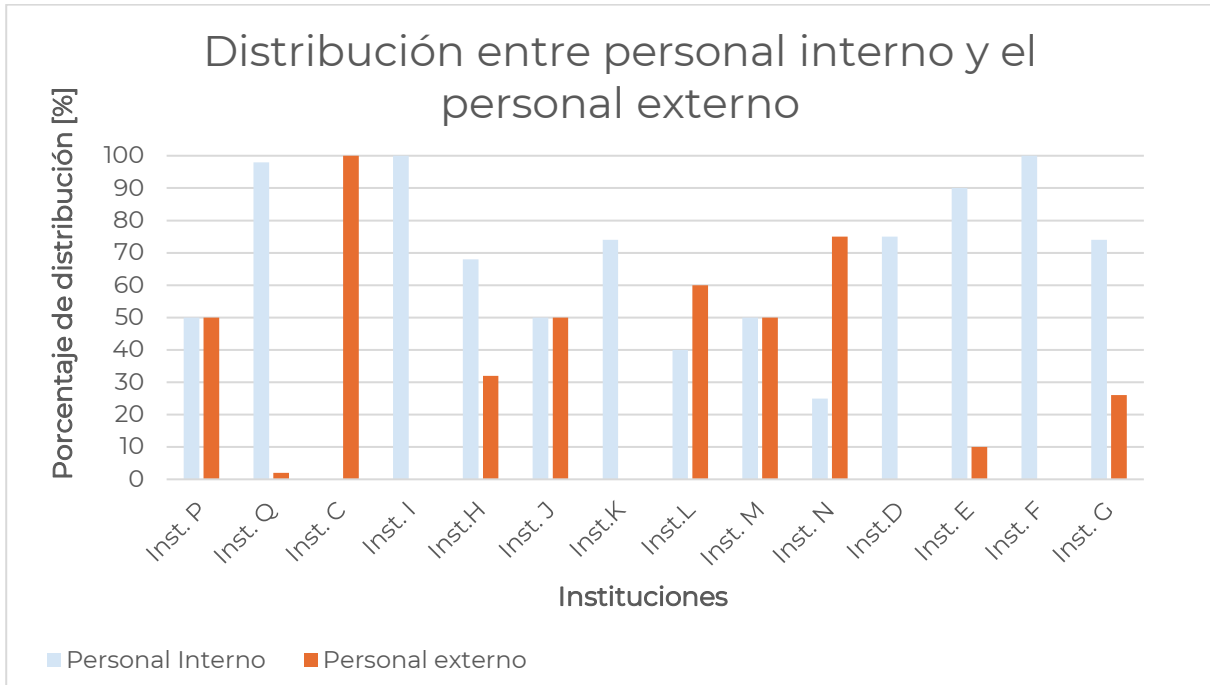


Figura N°56 Distribución porcentual de personal interno y externo involucrado en actividades de I+D+i en hidrógeno verde para cada institución Respuestas 14/21.

En la Figura N°57, se observa en qué tipo de actores confían las instituciones para externalizar sus tareas especializadas. Destaca que la mayoría de las instituciones recurre a universidades o instituciones de educación superior, lo que sugiere que gran parte del conocimiento técnico y de investigación se obtiene mediante colaboraciones académicas. Esto permite aprovechar experiencia en investigación aplicada, acceso a laboratorios y capitalizar en estudiantes de postgrado o doctores para apoyar proyectos complejos de hidrógeno verde.

En segundo lugar, un número relevante externaliza a consultoras especializadas, apuntando a la rapidez y profundidad en análisis de mercado, normativas o ingeniería de detalle que estos proveedores ofrecen. Empresas del sector energético y profesionales independientes aparecen empatados con 4 menciones cada uno, lo que revela que algunos centros prefieren subcontratar directamente a operadores del rubro o a expertos puntuales para tareas de operación, validación de procesos o asesorías técnicas. Finalmente, cámaras de comercio e institutos de investigación sólo resultan mencionados por una Institución dada uno, indicando que su rol en la cadena de valor es más puntual, asociado a temas de vinculación comercial o investigación muy específica. En conjunto, la distribución sugiere que, para avanzar en sus proyectos de hidrógeno verde, las instituciones confían principalmente en alianzas académicas y en consultoras especializadas, mientras que el apoyo de la industria y de expertos independientes también cumple un rol importante en etapas específicas.

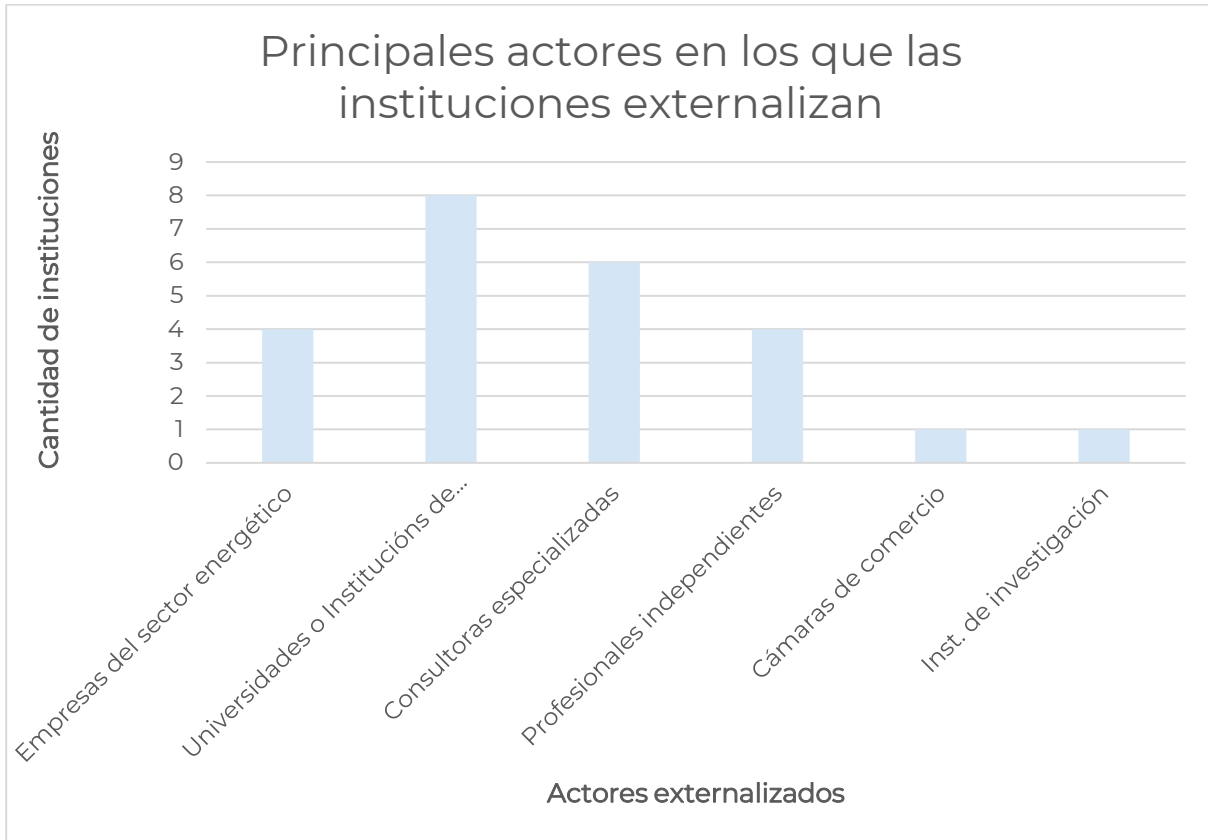


Figura N°57 Cantidad de instituciones que externalizan actividades de I+D+i a distintos actores  
 Respuestas 12/21 (Dos instituciones no externalizan la formación).

En la Figura N°58, se muestra el nivel de formación académica del personal interno en las instituciones analizadas. Se observa que solo un 10% posee formación técnica superior, lo que indica que la mayoría de las tareas, incluso las operativas, recae en profesionales con estudios de pregrado o postgrado. El 35% cuenta con grado universitario, reflejando que gran parte del trabajo cotidiano (diseño experimental, análisis de datos, desarrollo de prototipos) recae en ingenieros o licenciados. Además, el 31% del equipo interno posee maestría, lo que sugiere un fuerte componente de investigación aplicada y gestión de proyectos con metodologías más avanzadas. Finalmente, el 24% ostenta doctorado, lo que garantiza liderazgo en generación de nuevo conocimiento, publicaciones y diseño de líneas de investigación. En conjunto, el hecho de que casi el 90% del personal interno tenga estudios superiores a nivel de pregrado muestra un énfasis claro en capacidad de I+D y en mantener altos estándares académicos para el desarrollo de tecnologías relacionadas con el hidrógeno verde.

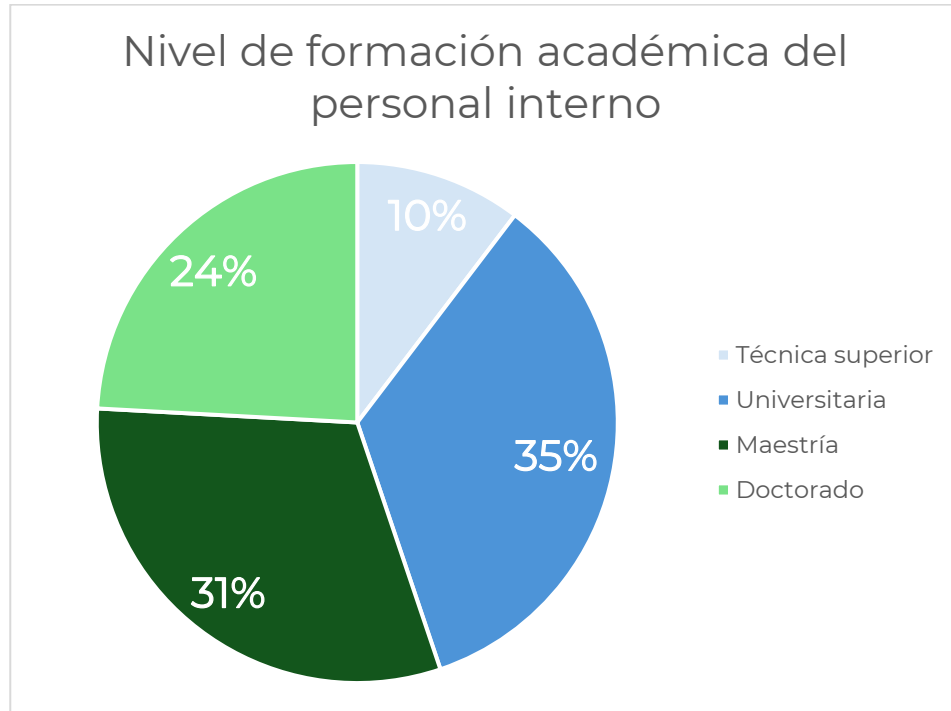


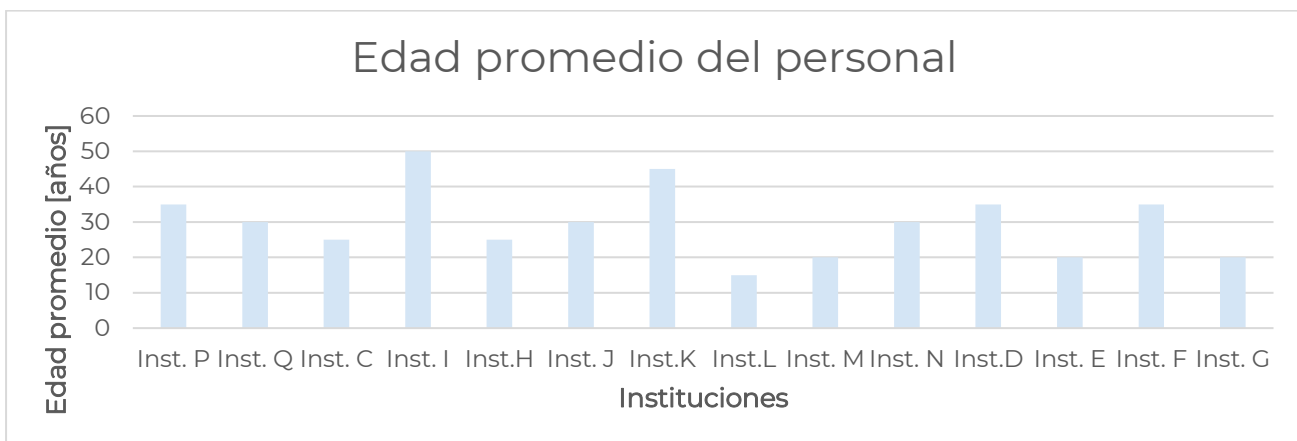
Figura N°58 Distribución porcentual del nivel de formación académica del personal interno involucrado en actividades de I+D+i en hidrógeno verde Respuestas 13/21.

En la Figura N°59, se muestra la distribución entre hombres y mujeres de las instituciones I+D+i, donde se observa que nueve instituciones cuentan con más de un 80% de hombres, mientras que cuatro se ubican en el rango del 60% al 80% masculino. Dos instituciones presentan un equipo equilibrado, con entre un 55% y 60% de hombres, y solo una institución cuenta con una mayor proporción de mujeres. Cabe destacar que, en promedio, la distribución es de un 80% de hombres frente a un 20% de mujeres. En conjunto, esto refleja un claro predominio masculino en la mayoría de los equipos de I+D+i, con muy pocas organizaciones acercándose a la paridad o invirtiendo la tendencia.



*Figura N°59 Distribución porcentual de género en el personal que participa en actividades de I+D+i en hidrógeno verde, mostrando la proporción de mujeres y hombres en cada institución. Respuestas 14/21.*

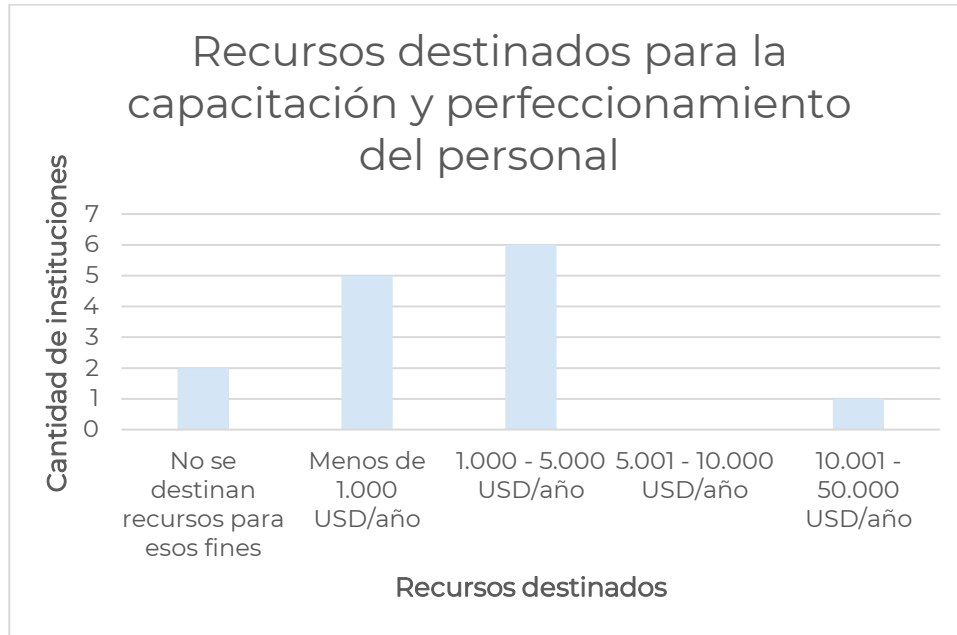
En la *Figura N°60*, se muestra la edad promedio del personal por institución, con un promedio global cercano a los 30 años. Esto contrasta con los datos previos, en los que la mayoría cuenta con formación universitaria de postgrado como maestrías o doctorados. Ese perfil joven y altamente calificado refleja el carácter innovador y emergente del sector: estas instituciones están apostando por talento fresco con ganas de explorar nuevas tecnologías y metodologías en hidrógeno verde. A su vez, la presencia de equipos más veteranos en centros consolidados garantiza la transferencia de experiencia y la madurez necesaria para guiar proyectos complejos. En conjunto, un plantel juvenil con alta formación académica sugiere que el sector ve en esta generación la esperanza de impulsar la investigación, escalar soluciones y consolidar el ecosistema nacional de hidrógeno verde.



*Figura N°60 Edad promedio del personal que participa en actividades de I+D+i en hidrógeno verde, mostrando el promedio de años de todos los colaboradores en cada institución Respuestas 14/21 (una institución con respuesta "15" considerada errónea).*

En la *Figura N°61*, se muestra la distribución de los recursos que las instituciones destinan anualmente a la capacitación y perfeccionamiento de su personal. La categoría mayoritaria contiene 6 instituciones que invierte entre 1.000 y 5.000 USD al año, seguida por 5 que destinan menos de 1.000 USD, una que supera los 10.000 USD y dos que no asignan fondos explícitos para formación.

Este patrón revela que, aunque el equipo interno es en su mayoría profesional y con altos grados académicos, los presupuestos asignados a entrenamiento siguen siendo relativamente modestos. Dicha combinación sugiere que muchas organizaciones confían en la experiencia existente y en la formación autodirigida o de bajo costo (por ejemplo, talleres internos), más que en programas de capacitación externos de mayor envergadura. A futuro, elevar los recursos para perfeccionamiento podría potenciar aún más la innovación y acelerar la adopción de nuevas tecnologías en hidrógeno verde.



*Figura N°61 Cantidad de instituciones según el rango de recursos anuales destinados a la capacitación y perfeccionamiento de personal en actividades de I+D+i en hidrógeno verde. Respuestas 14/21.*

#### 4.3.1.1 Personal del proyecto destacado de los centros I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del personal que participa en los proyectos destacados en hidrógeno verde y sus derivados, según lo reportado por las instituciones nacionales de investigación, desarrollo e innovación. El análisis considera la composición de los equipos en términos de funciones, niveles de formación, experiencia técnica y perfiles profesionales involucrados. Esta información permite identificar cómo se estructuran los equipos responsables de liderar iniciativas tecnológicas de referencia en el país, así como evidenciar brechas o fortalezas en cuanto a capacidades humanas para el desarrollo de proyectos científicos complejos en esta área estratégica.

##### 4.3.1.1.1 Perfil de la dirección del proyecto destacado

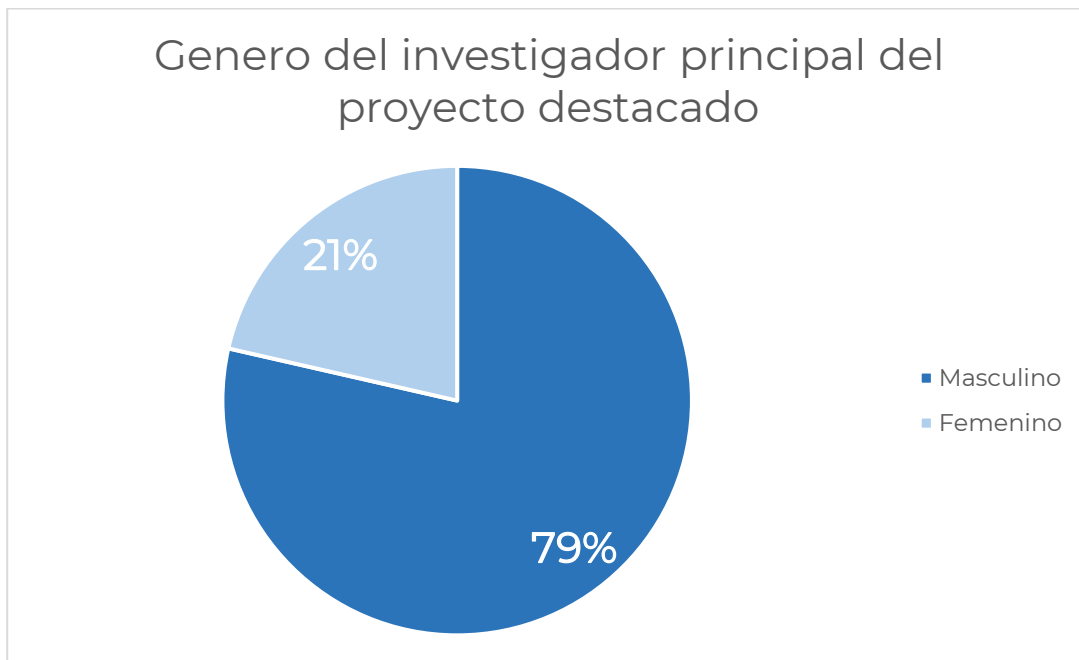
Este perfil se construye a partir de la información recopilada mediante encuestas aplicadas a las instituciones nacionales de investigación, desarrollo e innovación, en relación con el proyecto más emblemático en hidrógeno verde o sus derivados que cada una identificó.

En general, la dirección de estos proyectos está a cargo de profesionales con formación universitaria en disciplinas científicas o tecnológicas, principalmente en áreas de la ingeniería. Estos perfiles presentan experiencia en gestión de proyectos de I+D+i, liderazgo de equipos de investigación y, en varios casos, participación en iniciativas con articulación directa con el sector productivo o con agencias de financiamiento público.

La figura directiva cumple un rol estratégico en la definición de los objetivos científicos del proyecto, en la coordinación técnica entre disciplinas y en la vinculación con actores clave del ecosistema. Sin embargo, se identifican casos en los que la falta de especialización directa en tecnologías específicas

de hidrógeno podría representar una limitación para orientar con precisión el desarrollo del proyecto hacia los desafíos particulares que plantea esta industria en evolución.

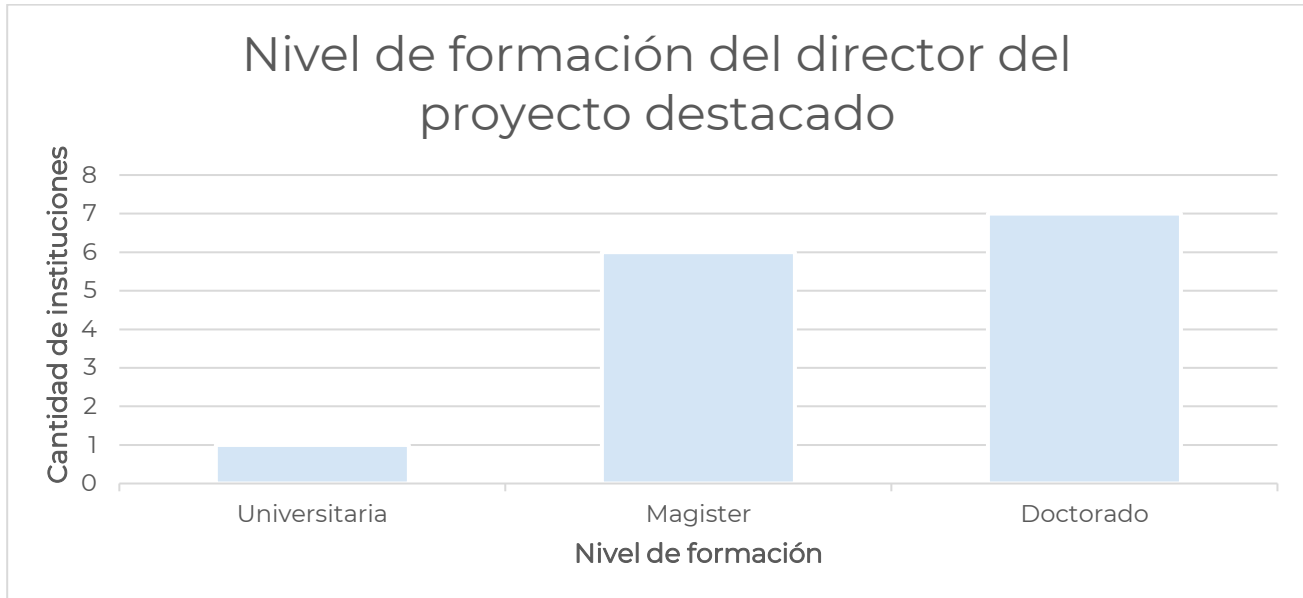
En la *Figura N°62*, se observa el sexo del investigador principal del proyecto destacado, donde se repite la misma tendencia que se vio anteriormente en la composición general del personal dentro de la institución: un 79% de los líderes de proyecto son hombres frente a un 21% de mujeres, prácticamente idéntico al reparto promedio de 80% hombres y 20% mujeres dentro del personal de la institución. Esto refuerza la predominancia masculina no solo en la composición del personal dentro de toda la institución, sino también en los puestos de mayor responsabilidad en I+D+i.



*Figura N°62 Distribución porcentual por sexo del investigador principal en cada proyecto destacado de I+D+i en hidrógeno verde. Respuestas 14/21.*

En la *Figura N°63*, se muestra el nivel de formación del director del proyecto destacado, donde solo una institución tiene a un director con formación universitaria; seis directores poseen grado de magíster y siete cuentan con doctorado. Esto deja en claro que casi todos los responsables de proyectos de hidrógeno verde requieren un nivel de formación muy elevado.

Este dato se alinea con la necesidad de contar con personal altamente calificado dentro de las instituciones. Al existir directores con magíster o doctorado, se asegura que quienes lideran el desarrollo y la implementación de tecnologías clave en hidrógeno verde tengan un dominio profundo tanto de la investigación como de los aspectos técnicos aplicados. En definitiva, el predominio de grados de posgrado entre los directores refleja la apuesta de cada institución por incorporar perfiles con formación avanzada que garanticen la solidez y la vanguardia científica en este campo.



*Figura N°63 Cantidad de instituciones según el nivel de formación del director de cada proyecto destacado (universitaria, magíster y doctorado). Respuestas 14/21.*

En la *Figura N°64*, se muestra los años de experiencia profesional del director del proyecto destacado, donde se aprecia que la mayoría de los directores concentra sus trayectorias en un rango de 5 a 15 años, mientras que solo cuatro excepciones superan los 24 años de experiencia. El promedio se sitúa en alrededor de 15 años, lo que indica que, aunque existen algunos investigadores veteranos, la mayor parte corresponde a profesionales de carrera intermedia.

Este perfil moderado encaja con el carácter juvenil y altamente calificado del ecosistema observado en gráficos previos: abundan personas con grados de maestría o doctorado que aún no acumulan décadas de trayectoria, pero ya cuentan con la credibilidad necesaria para liderar proyectos complejos. En conjunto, sugiere que el sector de I+D+i en hidrógeno verde está impulsado por perfiles dinámicos que combinan experiencia consolidada con la capacidad de innovación y flexibilidad propias de generaciones más jóvenes.



Figura N°64 Años de experiencia profesional del director de cada proyecto destacado de I+D+i en hidrógeno verde, mostrando el promedio de años de trayectoria de los principales responsables. Respuestas 14/21.

En la *Figura N°65*, se muestra el nivel de formación académica de las personas a las que el investigador principal del proyecto destacado imparte docencia, donde se observa que la mayoría de los destinatarios cuenta con formación universitaria, seguida de aquellos con grado de magíster y doctorado, lo que evidencia un claro énfasis en la transmisión de conocimientos especializados y de alto nivel académico. En contraste, apenas dos personas provienen de carreras técnicas superiores y solo una participa mediante diplomados o cursos de menor duración, categorías que reflejan una formación menos profunda en comparación con quienes cursan pregrado y posgrado. Además, cuatro investigadores principales no imparten docencia, lo que sugiere que parte del liderazgo se centra exclusivamente en actividades de investigación o gestión, sin involucrarse en la formación directa. En conjunto, este patrón muestra que los proyectos de hidrógeno verde priorizan entregar conocimientos avanzados a profesionales con bases sólidas, asegurando que los futuros investigadores y técnicos vinculados al sector posean la capacitación necesaria para afrontar retos tecnológicos complejos.

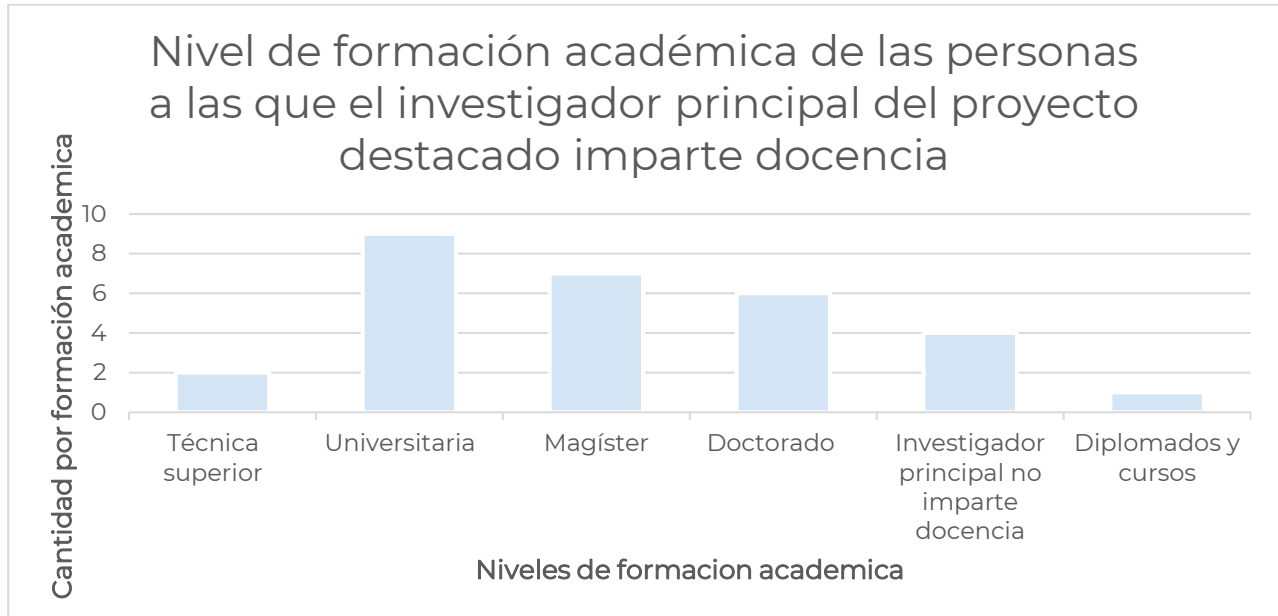


Figura N°65 Cantidad de instituciones según el nivel de formación académica de las personas a las que el investigador principal del proyecto destacado imparte docencia Respuestas 14/21.

#### 4.3.1.1.2 Perfil del personal del proyecto destacado de centros I+D+i

Esta sección describe el perfil del personal que conforma los equipos de los proyectos destacados en hidrógeno verde y sus derivados, según lo reportado por las instituciones nacionales de I+D+i. Se considera tanto al personal investigador como al técnico y de apoyo, analizando su nivel educativo, rango etario, especialización y funciones dentro del proyecto. La caracterización permite observar el grado de especialización de los equipos, su orientación hacia áreas científico-tecnológicas y su capacidad para abordar desafíos propios del desarrollo de tecnologías en hidrógeno. Asimismo, entrega información útil para identificar necesidades de fortalecimiento de capital humano en el contexto nacional.

El equipo humano del investigador principal, tal como se aprecia en la *Figura N°66*, está estructurado en tres niveles jerárquicos: en primer lugar, destaca con mayor número el personal técnico y de apoyo, encargado de las tareas prácticas indispensables para el proyecto. Este grupo constituye la base operativa y representa la mayoría del equipo. En segundo lugar, aparece el personal investigador, responsable del diseño experimental, análisis de resultados y validación científica; aunque su número es inferior al de los técnicos, sin duda son quienes marcan la dirección conceptual y los estándares científicos del proyecto. Finalmente, otro personal está presente en cantidad muy reducida, lo que evidencia que el investigador principal prioriza una estructura donde predomina la ejecución técnica y científica directa, delegando las labores de soporte a sólo lo estrictamente necesario para avanzar en las etapas operativas y analíticas del proyecto.

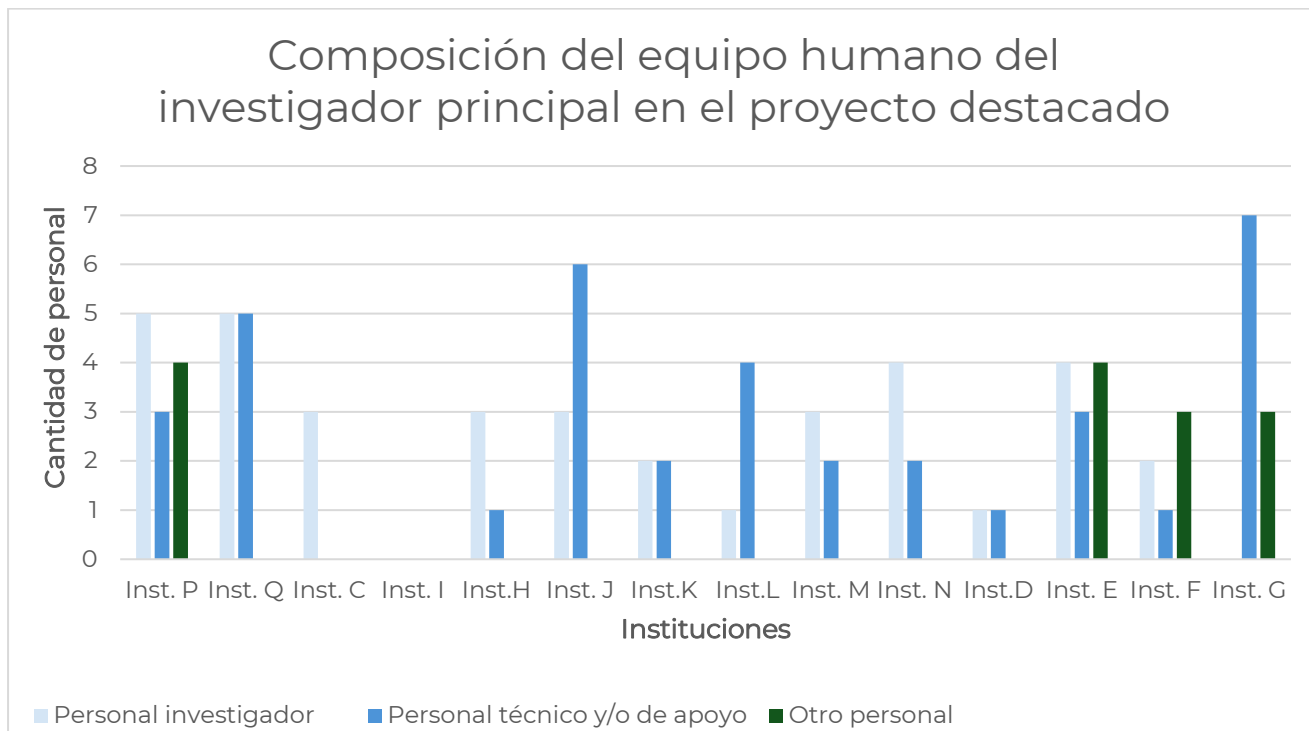


Figura N°66 Composición del equipo humano que colabora con el investigador principal en cada proyecto destacado. Respuestas 14/21.

### 4.3.2 Personal en proyecto de formación de personal

El personal involucrado en los proyectos de formación presenta perfiles variados en cuanto a nivel de estudios, experiencia profesional y funciones desempeñadas. En términos generales, predomina la presencia de profesionales con formación universitaria, principalmente en áreas de ingeniería, ciencias aplicadas y disciplinas técnicas, en concordancia con los contenidos abordados en los programas formativos vinculados al hidrógeno verde y sus derivados.

En muchos casos, los equipos formadores están conformados por docentes e instructores con trayectoria en docencia técnica y superior, así como experiencia en proyectos de investigación, desarrollo o colaboración con el sector productivo. Esta vinculación ha facilitado la incorporación de conocimientos actualizados y aplicados en los procesos formativos. No obstante, se identifican brechas en la disponibilidad de personal especializado en operación y mantenimiento de equipamiento técnico específico para hidrógeno y sus derivados, lo cual representa una limitación en el fortalecimiento integral de las capacidades formativas en esas áreas.

En la *Figura N°67*, se muestra que, a diferencia de las instituciones de I+D+i (donde predomina el personal interno), en estas instituciones de formación la colaboración con expertos externos resulta mucho más relevante. Solo una de ellas opera casi exclusivamente con su propio equipo, mientras que otra depende en gran medida de consultores externos. En conjunto, su modelo combina una base interna estable con aportes contratados para cubrir áreas especializadas, lo que implica un mayor peso relativo de personal externo que en los centros de investigación.

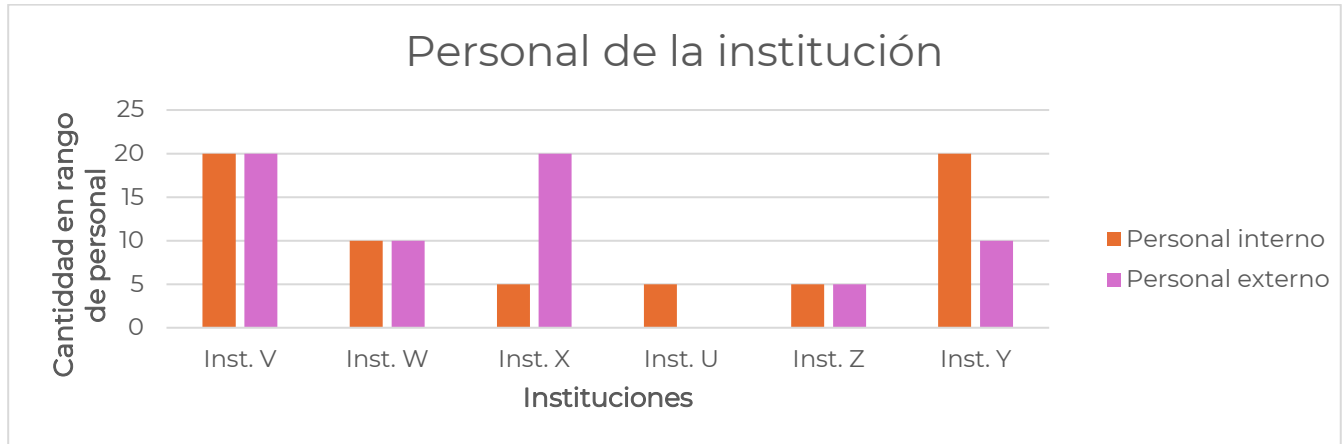


Figura N°67 Cantidad de personal interno y externo involucrado en las actividades de formación en cada institución. Respuestas 6/21.

En la *Figura N°68*, se muestra con qué tipos de actores las instituciones de formación externalizan parte de sus procesos de capacitación. Cinco de ellas recurren a empresas del sector energético, lo que indica que buscan incorporar experiencias y casos de uso reales en el ámbito industrial. Cuatro optan por profesionales independientes, probablemente expertos que ofrecen formación muy especializada y actualizada. Tres de los centros contratan a consultoras especializadas, lo que sugiere la necesidad de programas estructurados y metodologías probadas en otras organizaciones. Dos colaboran con universidades o instituciones de formación técnica, reforzando el vínculo entre la academia y el sector profesional. Finalmente, solo una institución menciona gremios y asociaciones como aliado, lo que refleja un uso reducido de este canal. En conjunto, estos resultados muestran que la mayoría de los programas de formación se apoya en entidades con experiencia directa en la industria energética, buscando así complementar la formación interna con conocimientos prácticos y casos de éxito real.

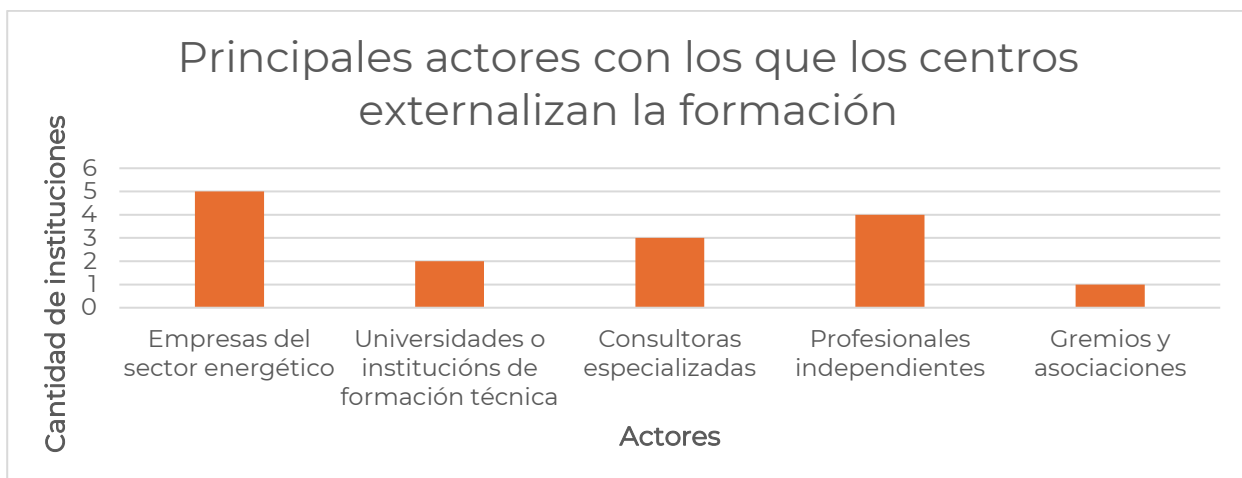
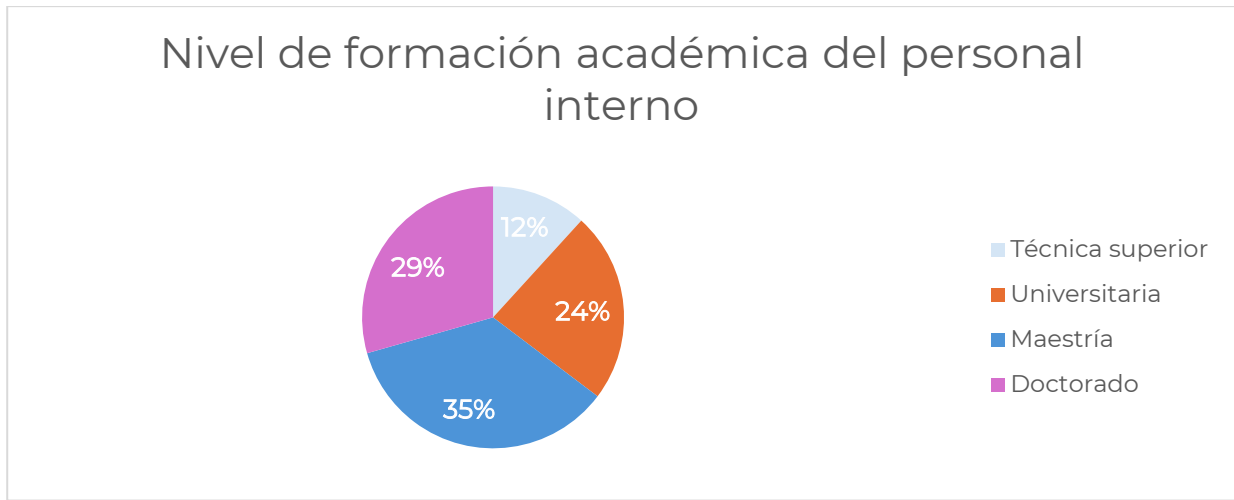


Figura N°68 Cantidad de instituciones que externalizan actividades de formación a distintos actores. Respuestas 5/21.

Dentro de la Figura N°69, se presenta la distribución de la formación académica interna revela un fuerte sesgo hacia estudios avanzados: la mitad de los equipos proviene de programas de postgrado (maestría y doctorado), mientras que los profesionales con solo título universitario ocupan un papel secundario y los técnicos superiores quedan en mínima proporción. Este predominio de posgrado indica que las instituciones buscan atraer perfiles capaces de liderar investigación compleja y colaborar en el diseño de soluciones innovadoras para el hidrógeno verde. Al mismo tiempo, el escaso número de técnicos sugiere un posible cuello de botella en tareas más operativas o prácticas, lo que podría ralentizar la implementación experimental de nuevas tecnologías.



*Figura N°69 Distribución porcentual del nivel de formación académica del personal interno dedicado a actividades de formación en hidrógeno verde y sus derivados. Respuestas 6/21.*

Dentro de la Figura N°70, se puede ver que en contraste con las instituciones de I+D+i, donde la representación masculina ronda el 80% frente a solo un 20% de mujeres, las organizaciones dedicadas a la formación presentan una distribución mucho más equilibrada. Mientras que en varios centros de formación los hombres siguen siendo mayoritarios (en torno al 60-75%), también hay casos donde las mujeres superan claramente a los hombres (75% vs. 25%), y al menos una institución muestra paridad exacta (50% / 50%). Esto indica que, si bien la investigación sigue concentrada en equipos dominados por hombres, los espacios de capacitación y enseñanza están adoptando plantillas más diversas y cercanas a la igualdad de género.

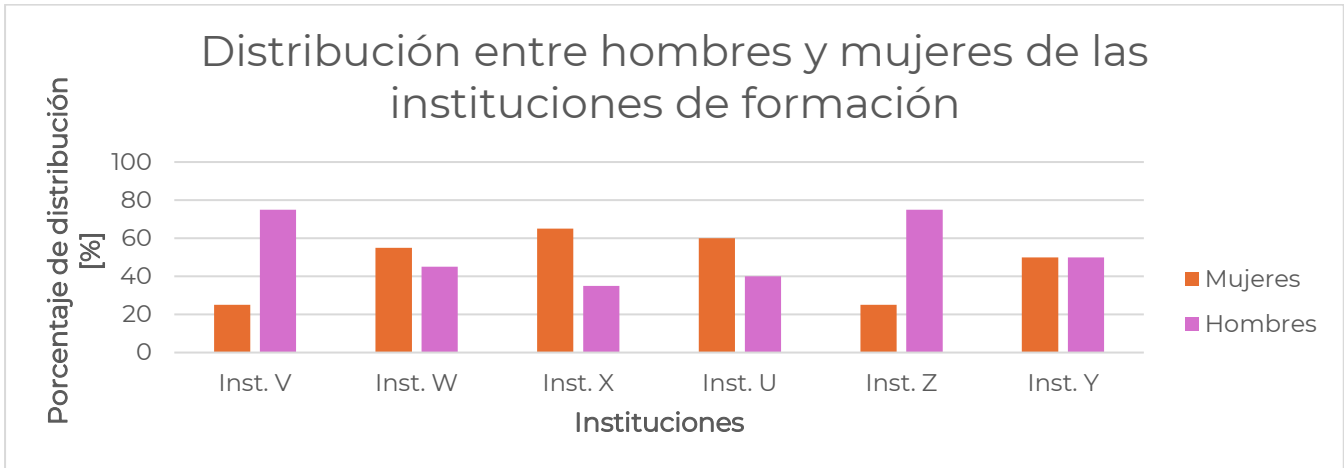


Figura N°70 Distribución porcentual de género del personal dedicado a actividades de formación en hidrógeno verde y sus derivados en las instituciones formativas. Respuestas 6/21.

En la Figura N°71, edad promedio del personal de las instituciones de formación se observa que la mayoría del personal está compuesto por profesionales en torno a los 35-50 años, mientras que ninguno supera los 50 años ni cae por debajo de los 30. Este rango contrasta con el promedio de aproximadamente 30 años estimado para equipos I+D+i, revelando que quienes se desempeñan en la formación del capital humano tienden a ser más experimentados en términos de edad.

Esta diferencia sugiere dos dinámicas complementarias: por un lado, los centros de capacitación requieren instructores con sólidos antecedentes profesionales y cierta madurez para impartir contenidos especializados.

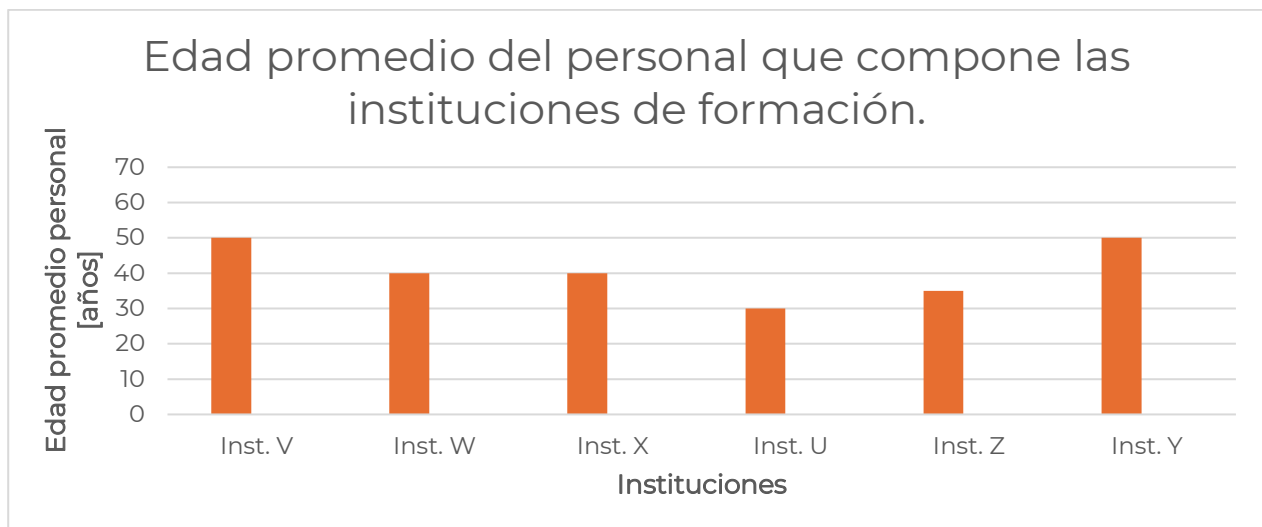


Figura N°71 Edad promedio del personal dedicado a la formación en hidrógeno verde y sus derivados. Respuestas 6/21.

Dentro de la Figura N°72, se puede ver que en comparación con los centros de I+D+i, donde la mayoría destinaba entre 1.000 y 5.000 USD al año a capacitar a su personal, en las instituciones de formación los montos son aún más reducidos: solo una invierte más de 10.000 USD, otra asigna 1.000-5.000 USD, dos dedican menos de 1.000 USD y dos ni siquiera contemplan un presupuesto específico. Esto refuerza la idea de que, en el ámbito formativo, se confía en recursos internos o en actividades de bajo costo más que en programas externos de alto valor, lo cual encaja con su enfoque de enseñanza práctica.

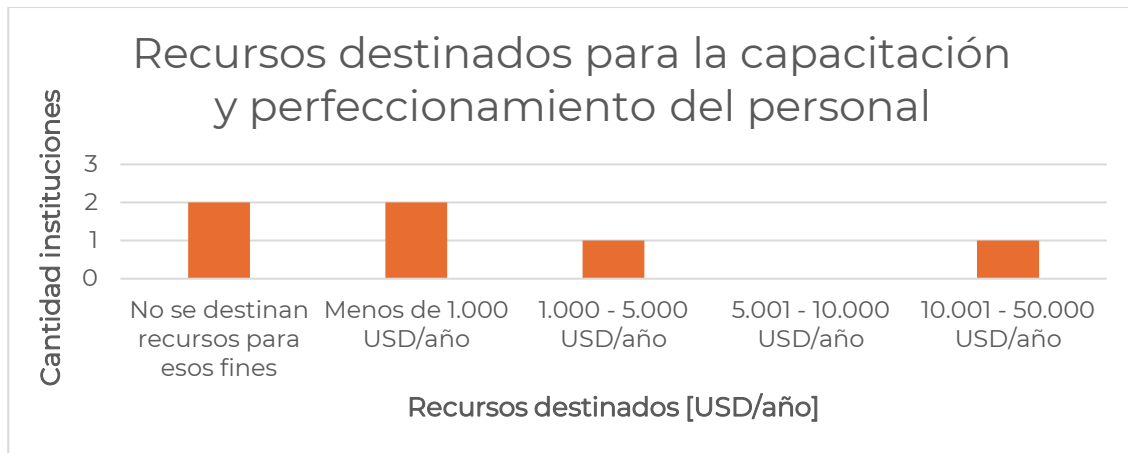


Figura N°72 Recursos anuales destinados a la capacitación y perfeccionamiento del personal en instituciones formativas. Respuestas 6/21.

#### 4.3.2.1 Personal del proyecto destacado de formación de personal

A partir de la información recopilada mediante encuestas, las instituciones identificaron sus proyectos más representativos en el ámbito de la formación de personal vinculado al hidrógeno verde y sus derivados. Estos proyectos se destacan por su nivel de implementación, cobertura temática y articulación con actores del ecosistema productivo y tecnológico.

En general, los proyectos seleccionados corresponden a programas de capacitación técnica o diplomados especializados, orientados a la actualización de competencias en áreas como seguridad en manejo de hidrógeno, operación de sistemas energéticos con hidrógeno, y mantenimiento de equipamiento asociado. Varios de ellos se desarrollan en coordinación con empresas del sector o en el marco de estrategias institucionales de vinculación con el medio.

La elección de estos proyectos como referentes permite identificar buenas prácticas, modelos replicables y áreas prioritarias para fortalecer la oferta formativa a nivel nacional, considerando tanto las necesidades actuales como las proyecciones de crecimiento de la industria del hidrógeno en Chile.

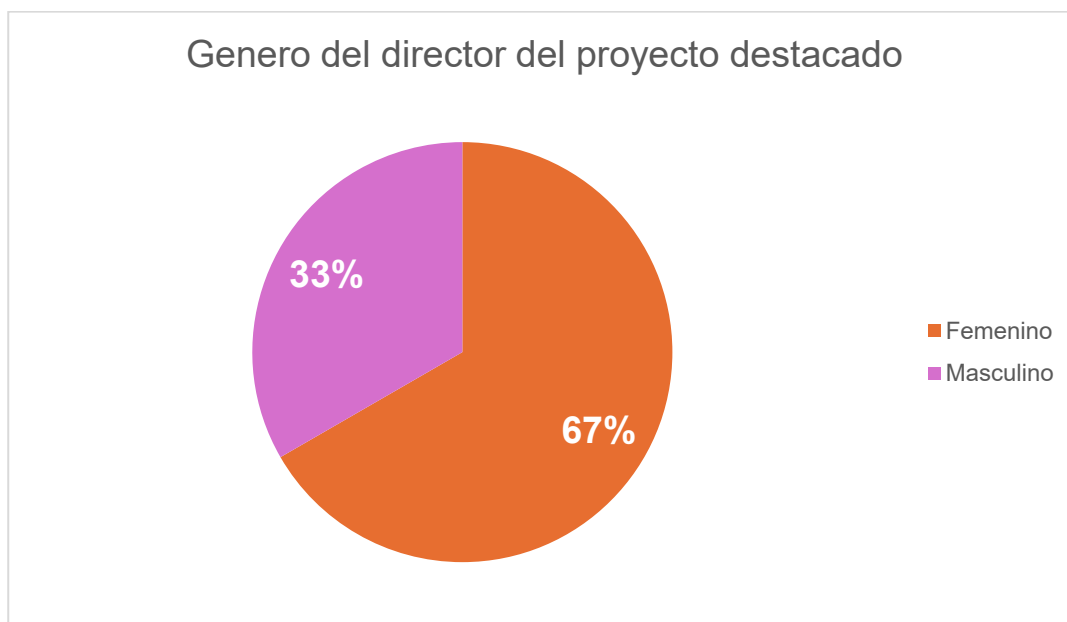
##### 4.3.2.1.1 Perfil de la dirección del proyecto destacado

Este perfil se construye a partir de la información recopilada mediante encuestas aplicadas a las instituciones participantes, en relación con el proyecto más emblemático en hidrógeno verde o sus derivados que cada institución identificó.

En general, la dirección de estos proyectos recae en profesionales con formación universitaria en áreas técnicas o científicas, particularmente en ingeniería. Estos perfiles suelen contar con experiencia en gestión académica, coordinación de programas formativos y, en varios casos, con participación en iniciativas de investigación, desarrollo o vinculación con el sector productivo.

La figura directiva cumple un rol clave en la articulación entre los objetivos de formación y las demandas del ecosistema tecnológico y productivo, liderando procesos de planificación curricular y vinculación institucional. No obstante, se identifican casos en los que la ausencia de especialización directa en tecnologías de hidrógeno puede limitar la capacidad de orientar estratégicamente los contenidos hacia las competencias específicas que requiere esta industria en crecimiento.

En la *Figura N°73*, se puede contrastar que en comparación con los centros de I+D+i, el 79% de los directores de proyectos destacados son hombres y solo el 21% son mujeres. En cambio, en las instituciones de formación, el 67% de los directores de proyecto son mujeres y el 33% son hombres. Esto indica que, mientras la investigación aplicada en hidrógeno verde sigue dominada por perfiles masculinos, los espacios de capacitación han incorporado más rápido a mujeres en puestos de liderazgo. Al tener directoras al frente de la formación, se crea un ejemplo concreto de equidad, lo que favorece la aparición futura de investigadoras que puedan cambiar la composición de género en los proyectos de I+D+i.



*Figura N°73 Distribución por sexo del director del proyecto destacado. Respuestas 6/21.*

En la *Figura N°74*, se observa que los años de experiencia de los directores de proyecto van desde 8 hasta 30 años, con un promedio cercano a 18 años. Este perfil sugiere que, aunque existen líderes muy veteranos, la mayoría combina madurez profesional con suficiente cercanía a las nuevas tendencias, permitiendo un equilibrio entre conocimiento acumulado e impulso innovador en hidrógeno verde.



Figura N°74 Años de experiencia profesional del director del proyecto destacado. Respuestas 6/21.

En la *Figura N°75*, se observa que, de los seis directores de proyecto, cinco cuentan con grado de Doctorado y solo uno posee Magíster; ninguno se ubica en niveles de formación universitaria básica o técnica. Esto indica que las instituciones exigen personal altamente calificado para liderar investigaciones en hidrógeno verde: la casi totalidad de los directores reúne formación de posgrado avanzado, lo cual refuerza la necesidad de contar con competencias especializadas para el desarrollo de estas tecnologías.

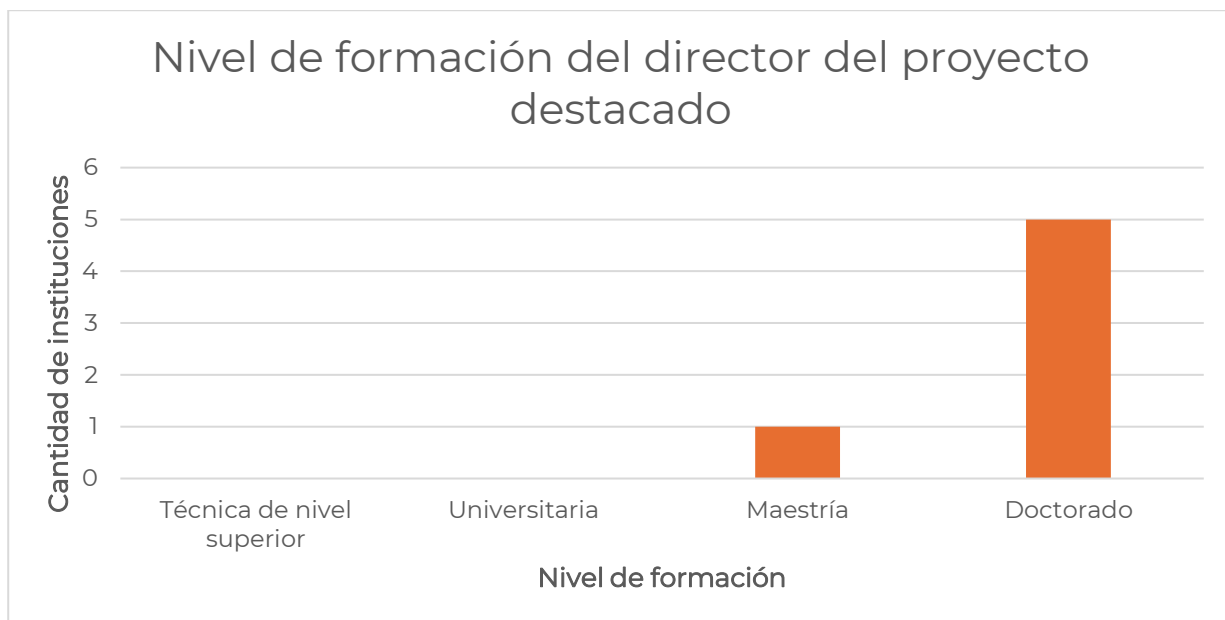
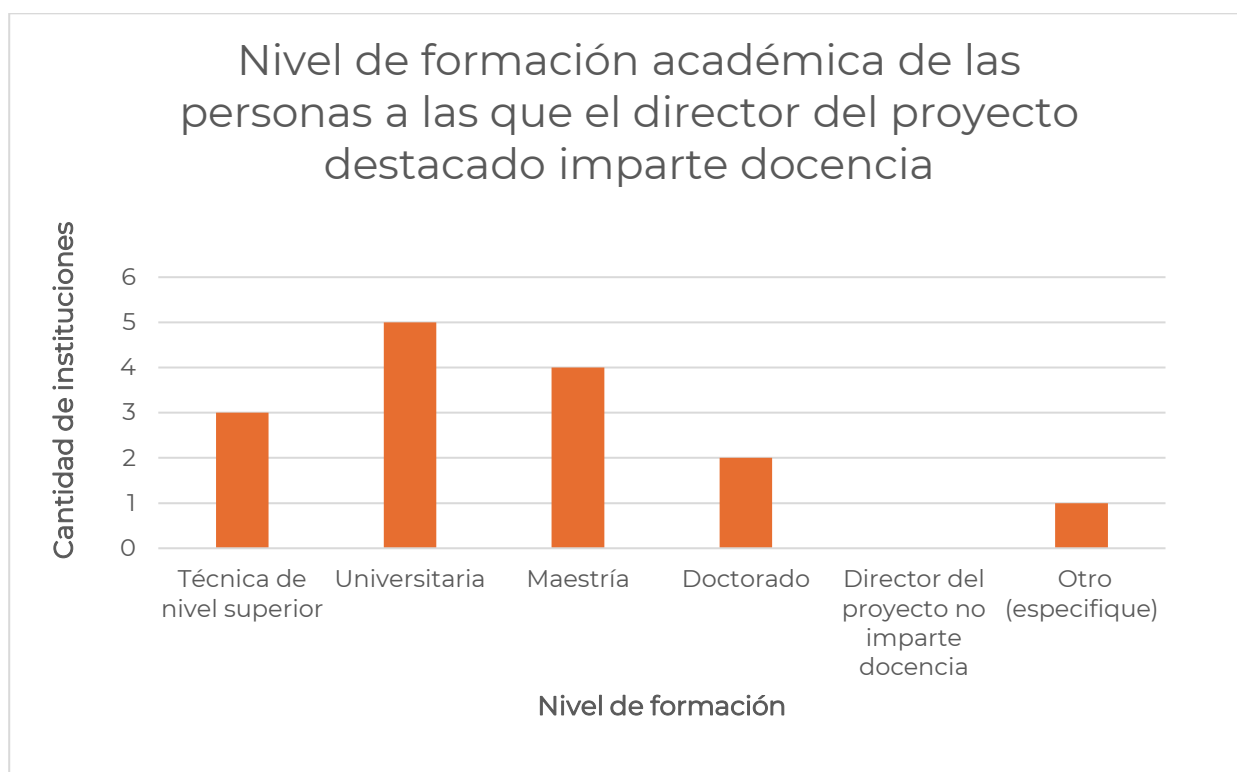


Figura N°75 Nivel de formación del director del proyecto destacado. Respuestas 6/21.

En la *Figura N°76*, se observa que la mayoría de quienes reciben clases de estos directores tienen formación universitaria o de posgrado (maestría y doctorado), lo que muestra que la práctica docente se orienta principalmente a niveles avanzados. Esto refuerza la idea de que las instituciones requieren transmitir conocimientos complejos y especializados, alineados con la sofisticación técnica que exige la industria del hidrógeno verde. En contraste, solo un par de casos imparten a estudiantes de nivel técnico superior y muy pocos cursos están dirigidos a personas sin un título formal, lo que subraya el énfasis en la formación académica avanzada dentro de estos programas. Sin embargo, esta concentración en posgrados podría evidenciar una carencia de cursos específicos para capacitar a técnicos en la operación y mantenimiento de tecnologías de hidrógeno, creando un posible vacío en mano de obra especializada para las etapas más prácticas de los proyectos.



*Figura N°76 Nivel de formación académica de las personas a las que el director del proyecto destacado imparte docencia. Respuestas 6/21.*

Con la información mostrada en esta sección se puede generar un perfil para los directores de proyectos en hidrógeno verde, basándose en la descripción realizada por las instituciones, refiriéndose específicamente a la dirección en sus proyectos más emblemáticos.

#### 4.3.2.12 Perfil del personal del proyecto destacado de formación de personal

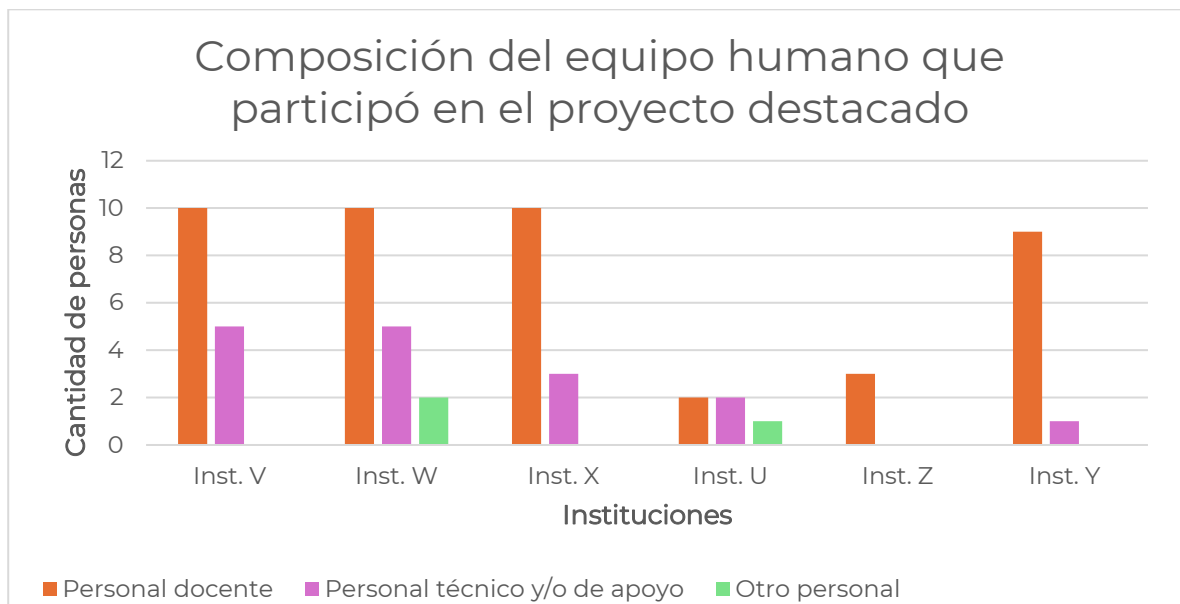
La composición del equipo humano en los proyectos destacados de formación en hidrógeno verde y sus derivados muestra una tendencia clara hacia la predominancia del personal docente, quienes

representan el componente principal en la mayoría de los casos. Estos equipos suelen estar integrados por entre 8 y 10 personas dedicadas a labores formativas, lo que evidencia un enfoque fuertemente académico en el desarrollo de estos proyectos.

El personal técnico y/o de apoyo también cumple un rol importante en varios proyectos, aportando a la ejecución operativa y al soporte necesario para implementar actividades formativas con componentes prácticos o vinculadas al uso de equipamiento especializado. En menor medida, se observa la participación de otro tipo de personal, como administrativos o encargados de gestión, según el alcance y grado de desarrollo institucional del proyecto.

Se identifican diferencias en el tamaño de los equipos, siendo algunos más acotados, lo que podría responder a un enfoque específico, a restricciones de recursos o a una etapa inicial de implementación. En conjunto, esta diversidad refleja las distintas estrategias adoptadas por las instituciones para abordar la formación de capital humano en un área emergente como el hidrógeno verde, donde la articulación entre perfiles docentes y técnicos es clave para el fortalecimiento de las capacidades nacionales.

En la *Figura N°77*, se aprecia que los equipos de los proyectos destacados están compuestos principalmente por docentes e integrantes con formación técnica, mientras que la categoría otro personal aparece en muy pocos casos y con presencia muy limitada. En la mayoría de las instituciones, el personal docente es el componente más numeroso y, junto con el apoyo técnico, conforma casi la totalidad del equipo. Esto refleja que el núcleo de estos proyectos depende de la combinación de experiencia académica y soporte especializado, mientras que la participación de otros roles es casi inexistente.



*Figura N°77 Composición del equipo humano que participó en el proyecto destacado. Respuestas 6/21.*

En síntesis, la configuración de los equipos humanos en los proyectos destacados de formación vinculados al hidrógeno verde evidencia una orientación principalmente académica, complementada por perfiles técnicos que facilitan la implementación práctica. Si bien existen diferencias en la magnitud y composición de los equipos, la tendencia general apunta a estructuras centradas en la docencia con apoyo operativo, lo cual permite abordar tanto la transferencia de conocimientos teóricos como el desarrollo de habilidades aplicadas. Este modelo de articulación entre formación y soporte técnico aparece como un componente clave para consolidar capacidades en un sector aún en desarrollo.

## 4.4 Infraestructura, equipamiento y recursos

Este capítulo presenta un análisis de la infraestructura, el equipamiento disponible y los recursos técnicos con los que cuentan tanto las instituciones nacionales de investigación, desarrollo e innovación como aquellas dedicadas a la formación de personal, en relación con el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados. El levantamiento de información considera espacios habilitados para la investigación aplicada, la experimentación y la formación técnica, así como los sistemas, tecnologías y plataformas que sustentan estas actividades. Esta caracterización permite identificar capacidades instaladas en ambos tipos de instituciones, niveles de especialización técnica, y brechas que podrían limitar la ejecución de proyectos, la formación práctica o la vinculación con el sector productivo. La información contenida en esta sección es fundamental para orientar decisiones estratégicas en materia de fortalecimiento institucional, inversión en infraestructura y desarrollo de capacidades.

### 4.4.1 Infraestructura de los centros de I+D+i

Esta sección describe la infraestructura principal con el que cuentan los centros nacionales de investigación, desarrollo e innovación analizados. En la *Tabla N°16*, se detallan los laboratorios, plantas piloto, bancos de ensayo, espacios de simulación y otras instalaciones relevantes que sustentan sus capacidades técnicas. El objetivo es identificar los elementos clave que permiten a estos centros liderar procesos de investigación, validación y transferencia tecnológica en torno al desarrollo y aplicación del hidrógeno verde.

Según la información mostrada en la *Tabla N°16*, se aprecia que la mitad de las instituciones encuestadas cuenta con laboratorios destinados a proyectos I+D+i, sumando 12 en total, pero solo un 43% dispone de plantas piloto y bancos de prueba. Esto revela que, pese a que algunos centros pueden realizar ensayos a escala intermedia, la mayoría aún no tiene acceso a instalaciones que permitan validar procesos antes de trasladarlos al ámbito industrial. Las zonas de pruebas de campo son escasas (14% con 3 ubicaciones), lo que limita la capacidad de evaluar tecnologías en entornos reales. Asimismo, solo un 21% de las entidades dispone de zonas y vehículos para el transporte interno de personal y equipamiento, lo que indica dependencia de infraestructura fija y dificulta el traslado de equipos voluminosos, afectando la flexibilidad operativa de los proyectos.

En el plano logístico, el 64% de los centros cuenta con zonas administrativas para gestionar iniciativas I+D+i, mientras que el 50% ofrece áreas de descanso y alimentación para el personal. Por otro lado, solo un 29% dispone de áreas dedicadas al almacenamiento de materiales y sustancias para I+D+, lo que sugiere falta de capacidad para manejar reactivos y componentes sensibles de manera centralizada. En conjunto, la infraestructura disponible prioriza laboratorios y soporte administrativo, pero deja una importante brecha en cuanto a plantas piloto, bancos de prueba, pruebas de campo y

logística de transporte, áreas que deberían fortalecerse para consolidar un ecosistema de investigación y desarrollo en hidrógeno verde más robusto y versátil.

Tabla N°16 Infraestructura identificada en los centros de I+D+i mediante encuestas. Respuestas 14/21.

N°	Infraestructura y Equipamiento Principal	Valor	Frecuencia	Porcentaje
1	<u>Laboratorios</u> destinados a proyectos I+D	Sí	7	50%
		No	7	50%
2	N° total de <u>laboratorios</u> destinados a proyectos I+D	N° de laboratorios	12	
3	<u>Plantas piloto</u> destinadas a proyectos I+D	Sí	6	43%
		No	8	57%
4	N° total de <u>plantas piloto</u> destinadas a proyectos I+D+i	N° de plantas piloto	6	
5	<u>Banco de pruebas</u> destinados a proyectos I+D	Sí	6	43%
		No	8	57%
6	N° total de <u>banco de pruebas</u> destinados a proyectos I+D	N° de banco de prueba	6	
7	<u>Zonas de pruebas de campo</u> destinadas a proyectos I+D	Sí	2	14%
		No	12	86%
8	N° total de <u>zonas de pruebas de campo</u> destinadas a proyectos I+D	N° zonas de prueba de campo	3	
9	<u>Áreas de almacenamiento</u> de materiales y sustancias destinadas a proyectos I+D	Sí	4	29%
		No	10	71%
10	N° de <u>áreas de almacenamiento</u> destinadas a proyectos I+D	N° áreas de almacenamiento	5	
11	Zonas de <u>trabajos administrativos</u> para proyectos I+D	Sí	9	64%
		No	5	36%
12	N° total de zonas de <u>trabajos administrativos</u> para proyectos I+D	N° de zonas	12	
13	<u>Zonas de descanso</u> y alimentación de personal	Sí	7	50%
		No	7	50%
14	N° total de <u>zonas de descanso</u> y alimentación de personal	N° de zonas	8	
15	N° total de <u>zonas para transporte de personal</u> y para equipamiento I+D	Sí	3	21%
		No	11	79%
16	N° total de <u>zonas para transporte de personal</u> y para equipamiento I+D	N° de móviles	3	

La información mostrada en la *Tabla N°17*, muestra que, las instituciones presentan una marcada heterogeneidad en cuanto a la superficie destinada a infraestructura para actividades relacionadas con hidrógeno verde. Algunas, disponen de espacios amplios que permiten albergar laboratorios, plantas piloto o bancos de prueba, mientras que otras operan con superficies más acotadas, suficientes para talleres o actividades académicas de escala media. También hay casos con áreas muy reducidas, enfocadas principalmente en ensayos de laboratorio o validaciones a pequeña escala.

Junto con ello, un grupo importante de organizaciones declara no conocer con precisión la superficie disponible o simplemente no reporta esta información, lo que refleja limitaciones en el levantamiento o la gestión de sus activos. Esta dispersión en capacidades dificulta una lectura clara del panorama nacional y evidencia la necesidad de avanzar en la identificación y articulación de espacios, con miras a fortalecer de manera estratégica la infraestructura disponible para investigación, desarrollo y validación tecnológica en hidrógeno verde.

*Tabla N°17 Muestra la superficie total de infraestructura con la que cuentan las instituciones de I+D+i encuestadas. Respuestas 14/21.*

Institución	Superficie total de infraestructura en [m <sup>2</sup> ]
Institución X	1000
Institución U	400
Institución V	Desconoce
Institución W	NA
Institución Y	Desconoce
Institución Z	3500
Institución G	400
Institución H	500
Institución I	Desconoce
Institución J	40
Institución K	80
Institución L	100
* Institución M <i>(En proceso de cierre anticipado)</i>	576
Institución N	500

La *Figura N°78*, muestra que las instituciones presentan enfoques diversos en la distribución de su infraestructura. En varios casos, la mayor parte de la superficie se destina a laboratorios, plantas piloto o bancos de prueba, lo que evidencia una orientación prioritaria hacia la experimentación, la validación tecnológica y el desarrollo de prototipos. Otras entidades concentran una proporción considerable de su espacio en áreas administrativas, reflejando un perfil más enfocado en la coordinación, la gestión de proyectos o el apoyo logístico a la investigación. Asimismo, se observan configuraciones mixtas en las que los laboratorios coexisten con zonas de almacenamiento, oficinas y espacios destinados al descanso del personal, lo que indica una estructura más equilibrada y multifuncional. En conjunto, los resultados revelan que la distribución de superficies responde tanto a las funciones y prioridades operativas de cada institución como a su nivel de madurez técnica. Esta diversidad pone de manifiesto la importancia de una planificación estratégica del uso del espacio que permita fortalecer la infraestructura técnica y operativa necesaria para el desarrollo del ecosistema nacional de hidrógeno verde.

Esta diversidad refleja niveles de madurez y estrategias distintas: instituciones grandes concentran recursos en laboratorios, mientras centros más pequeños equilibran trabajo de laboratorio con gestión y apoyo operativo.

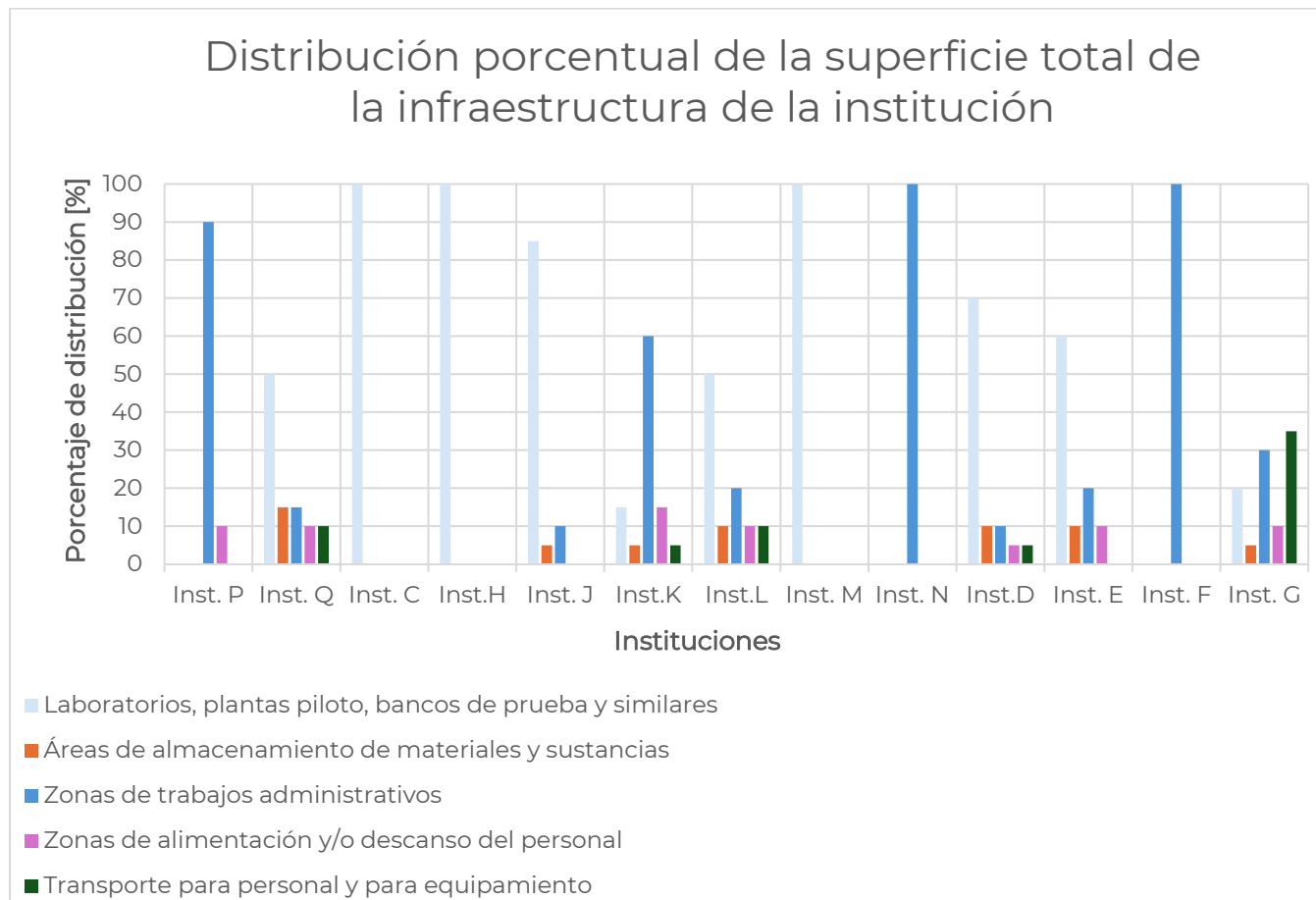
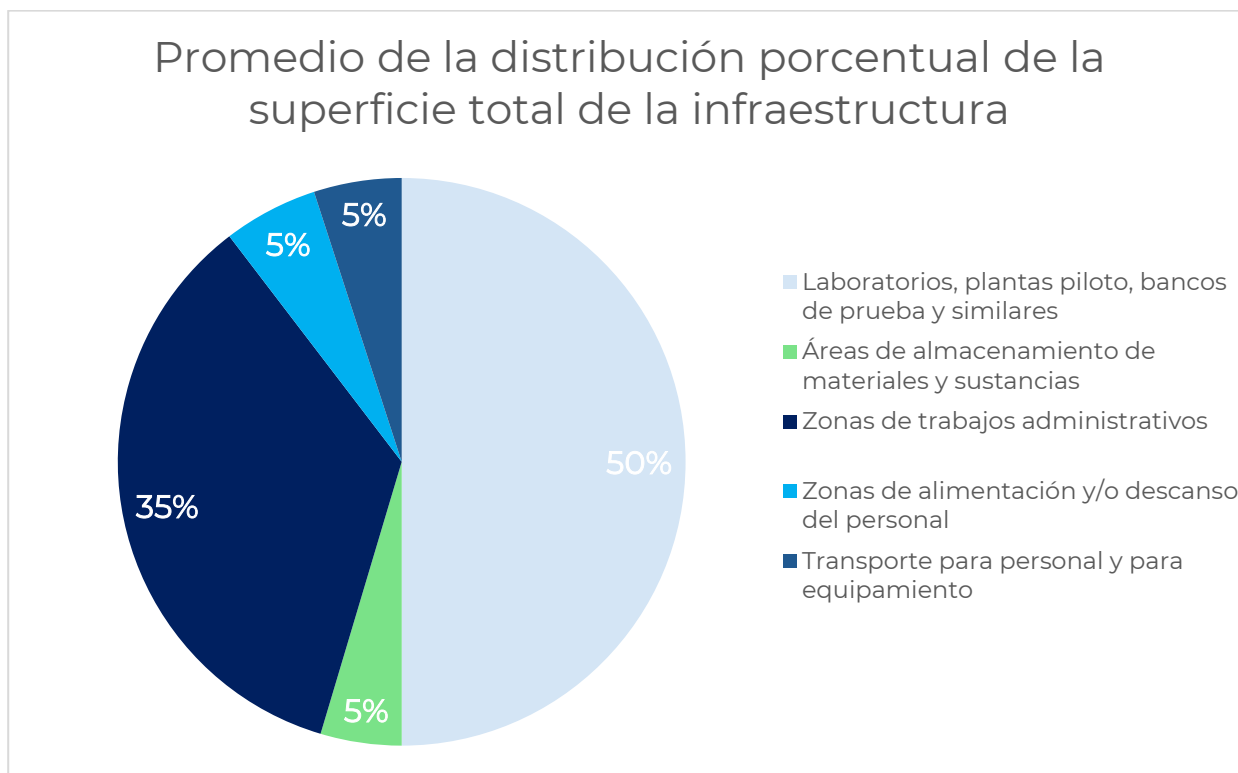


Figura N°78 Distribución porcentual de la superficie total de la infraestructura en cada institución de I+D+i, desglosada por tipo de área. Respuestas 14/21.

Dentro de la *Figura N°79*, se puede apreciar una clara prioridad por las actividades técnicas, con una proporción significativa del espacio dedicado a laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba. Esta orientación sugiere un compromiso fuerte con la experimentación, validación y desarrollo tecnológico aplicado al hidrógeno verde. A su vez, una parte relevante de la superficie se destina a funciones administrativas, lo que da cuenta de la necesidad de contar con estructuras de gestión que permitan operar y coordinar los proyectos de manera eficiente. En cambio, los espacios destinados a almacenamiento, logística interna y bienestar del personal ocupan una proporción menor, lo que indica que, si bien están presentes, no constituyen el eje central de la planificación espacial. Esta configuración revela un modelo institucional centrado en la investigación aplicada, apoyado por funciones administrativas, y con una menor disponibilidad de espacios complementarios.



*Figura N°79 Promedio de la distribución porcentual de la superficie total de infraestructura en los centros de I+D+i, desglosada según el uso de cada área. Respuestas 14/21.*

El análisis de los montos de inversión destinados a infraestructura, mostrados en la *Figura N°80*, de soporte para proyectos de I+D+i evidencia una clara concentración en rangos bajos. En transporte de personal, tres instituciones informan gastos “Hasta 10.000 USD”, una alcanza el tramo “50.001-500.000 USD” y otra llega a “1.000.001-10.000.000 USD”. Esto indica que, aunque la mayoría cubre necesidades de traslado con presupuestos reducidos, existen casos puntuales donde se requieren vehículos o equipos logísticos de mayor envergadura. En las zonas de alimentación y descanso, cuatro centros invierten “Hasta 10.000 USD” y uno destina entre “50.001-500.000 USD”, lo que demuestra que las principales instituciones satisfacen este requerimiento con recursos muy limitados, salvo una entidad que realiza una actualización o ampliación significativa de sus áreas comunes.

Respecto a los espacios administrativos, el gráfico revela una mayor dispersión de montos: cuatro instituciones asignan “Hasta 10.000 USD” para habilitar oficinas o salas de reunión básicas; tres destinan entre “10.001-50.000 USD” para equipamiento adicional; dos elevan la inversión a “50.001-500.000 USD”; y una invierte entre “500.001-1.000.000 USD” en mejoras sustanciales de sus instalaciones. Estos resultados sugieren que, aunque la praxis general privilegia inversiones mínimas en infraestructura de apoyo, algunas instituciones optan por remodelaciones o construcciones más ambiciosas para coordinar proyectos de hidrógeno verde. En conjunto, la tendencia predominante a mantener inversiones de apoyo en montos reducidos revela la preferencia por canalizar recursos hacia equipamiento técnico y laboratorios, mientras que solo casos específicos requieren financiamientos de mayor magnitud para satisfacer necesidades logísticas y administrativas avanzadas.

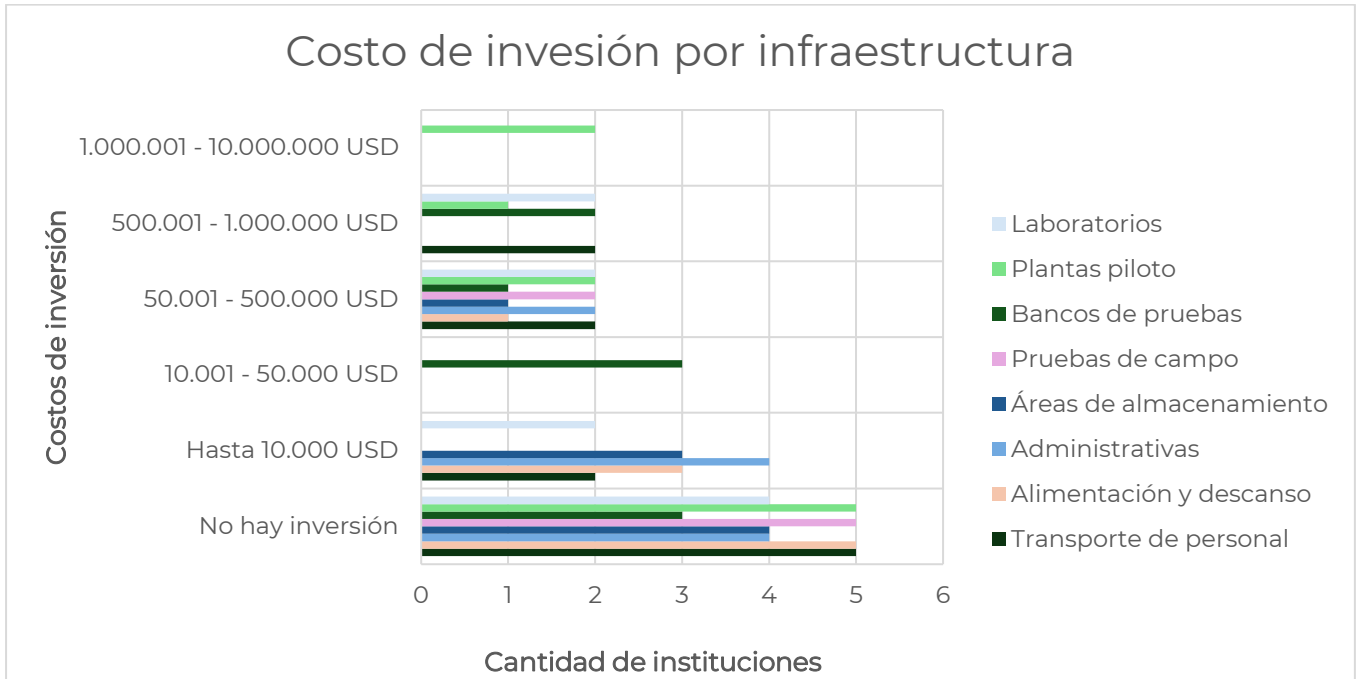
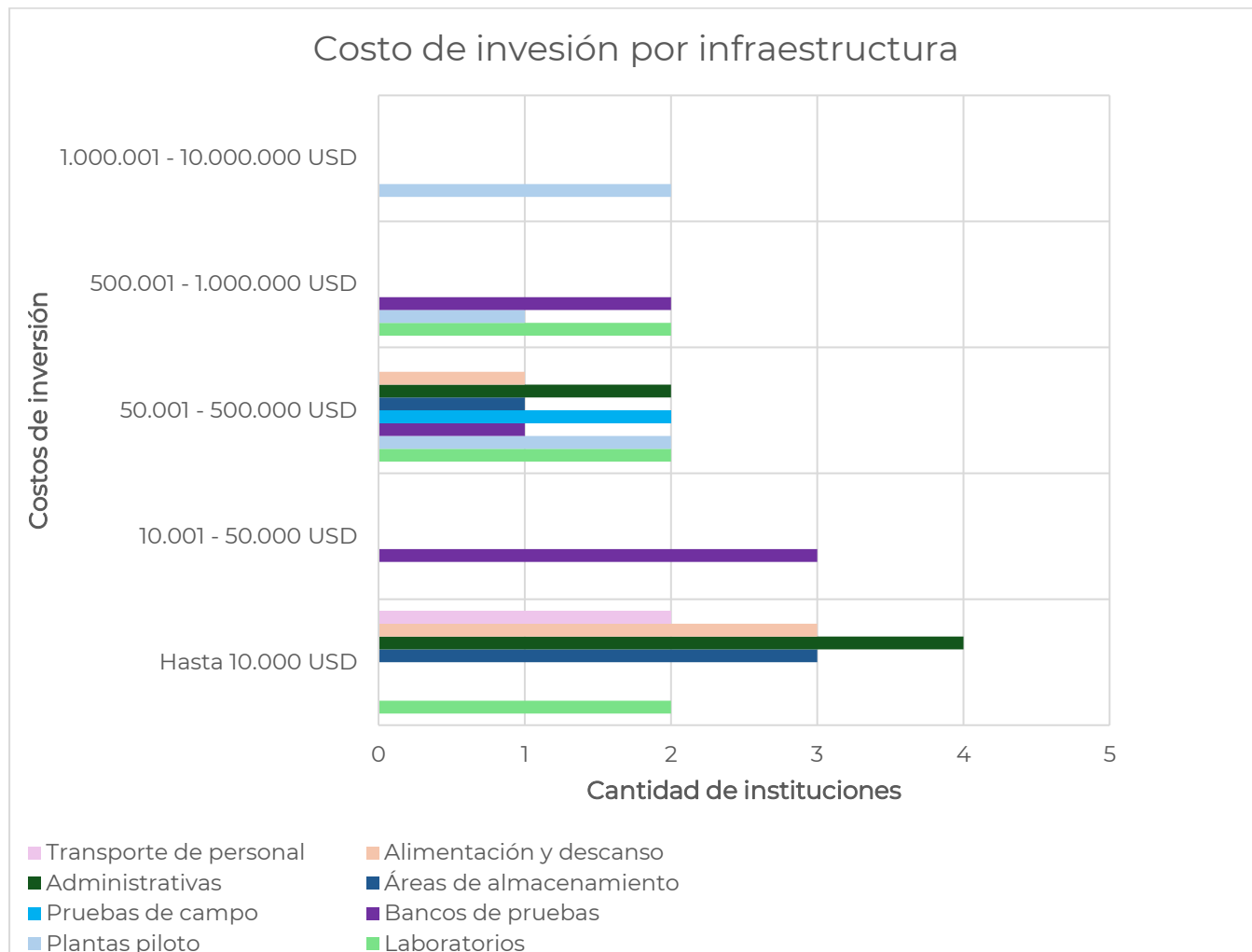


Figura N°80 Distribución del número de instituciones según el rango de inversión destinado a infraestructuras de distintas áreas dentro de la institución. Respuestas 13/21.

Los datos mostrados en la *Figura N°81*, permiten identificar que la mayoría de las instituciones destinan montos reducidos a componentes básicos como laboratorios, áreas de almacenamiento y transporte de personal, situándose generalmente en rangos bajos de inversión. Por el contrario, elementos más complejos, como bancos de pruebas y plantas piloto, requieren desembolsos mayores, ubicándose frecuentemente en rangos intermedios o altos. En conjunto, esto sugiere que, si bien la infraestructura fundamental puede financiarse con presupuestos modestos, las etapas de validación a mayor escala y los espacios de prueba experimentales exigen recursos significativamente superiores. Este patrón refleja la necesidad de escalar las inversiones, primero asegurar lo esencial para operar laboratorios y talleres, y luego abrir líneas de financiamiento especiales para expandir hacia equipamiento que permita pruebas piloto y de demostración en el sector del hidrógeno verde.



*Figura N°81 Distribución del número de instituciones según el rango de inversión destinado a infraestructuras de distintas áreas, específicamente a proyectos de hidrógeno verde. Respuestas 14/21.*

La *Figura N°82*, muestra un amplio espectro en el porcentaje de infraestructura que cada institución dedica específicamente a proyectos de hidrógeno verde y derivados. Por un lado, Institución J e Institución E destinan el 100% de su superficie a estas actividades, lo que indica una focalización total en I+D+i en hidrógeno verde. De cerca les sigue Institución D con alrededor de un 90%, e Institución Q con un 80%, señalando también una apuesta muy decidida por potenciar sus capacidades técnicas en esta área. Institución M e Institución N destinan entre 50% y 60% de sus instalaciones al desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, reflejando un equilibrio entre esta línea de trabajo y otras actividades complementarias.

En el rango intermedio, Institución L asigna cerca de un 35% de su infraestructura, e Institución G un 40%, lo que sugiere que, si bien dedican parte importante de sus recursos a hidrógeno, mantienen espacio adicional para otras labores o proyectos. El resto de las instituciones se ubican alrededor del 15%, reservando un segmento menor para hidrógeno verde y destinando el resto a tareas generales de investigación.

En conjunto, estos resultados muestran que algunas instituciones están completamente volcadas al desarrollo de hidrógeno verde, mientras que otras poseen un enfoque más diversificado o se encuentran en etapas iniciales de asignación de espacios para estos fines.

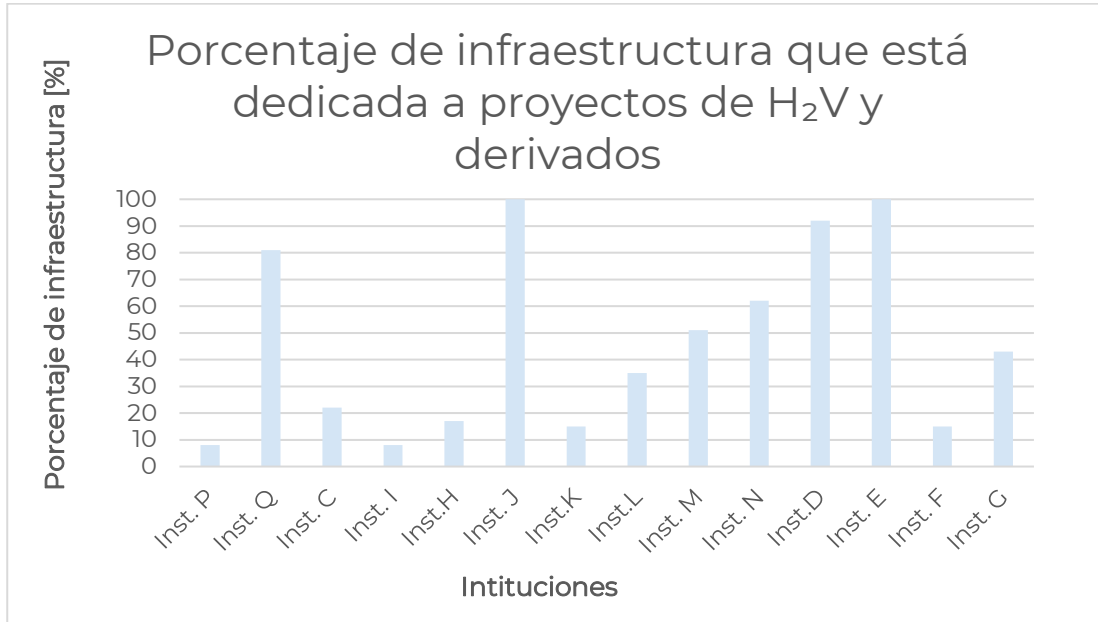


Figura N°82 Proporción de la infraestructura total de cada institución dedicada a proyectos de hidrógeno verde y derivados. Respuestas 14/21.

La dedicación anual al hidrógeno verde y sus derivados varía ampliamente entre las instituciones, indicando distintos niveles de compromiso y capacidad operativa, como se puede apreciar en la *Tabla N°18*.

Tabla N°18 Tiempo programado por parte de las instituciones y centros de I+D+i que destinan a actividades relacionadas con hidrógeno verde y derivados.

Institución	Tiempo programado a actividades relacionadas con hidrógeno verde y derivados
Institución X	Entre 1 y 3 meses (< 2.160 horas/año)
Institución U	Entre 9 y 12 meses (< 8.640 horas/año)
Institución V	1 mes o menos (< 720 horas/año)
Institución W	entre 9 y 12 meses (< 8.640 horas/año)
Institución Y	1 mes o menos (< 720 horas/año)
Institución Z	Entre 6 y 9 meses (< 6.480 horas/año)

Institución G	Entre 9 y 12 meses (< 8.640 horas/año)
Institución H	Entre 1 y 3 meses (< 2.160 horas/año)
Institución I	0
Institución J	Entre 1 y 3 meses (< 2.160 horas/año)
Institución K	Entre 9 y 12 meses (< 8.640 horas/año)
Institución L	Entre 9 y 12 meses (< 8.640 horas/año)
*Institución M ( <i>En proceso de cierre anticipado</i> )	Entre 9 y 12 meses (< 8.640 horas/año)
Institución N	Entre 1 y 3 meses (< 2.160 horas/año)

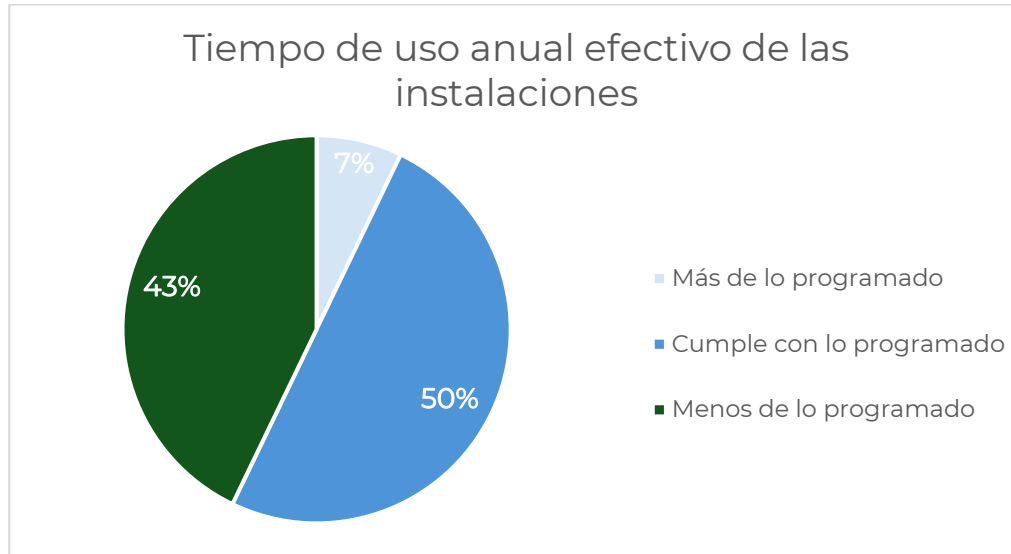
La dedicación de los centros I+D+i puede clasificarse de la siguiente manera:

- **Alta dedicación (9-12 meses):** Esto refleja que estas entidades consideran el tema como núcleo de su investigación y operaciones, con equipos y recursos enfocados casi permanentemente en I+D, ensayos de campo, desarrollo de prototipos y formación continua.
- **Dedicación intermedia (6-9 meses):** Este nivel sugiere que, aunque realiza también otras actividades, reserva un porcentaje sustancial de su agenda para proyectos de procesamiento, pilotaje y validación de tecnologías H<sub>2</sub>.
- **Baja dedicación (1-3 meses):** Para estos centros, las labores en hidrógeno verde ocupan momentos puntuales del año, por ejemplo, fases de puesta en marcha de un laboratorio o eventos formativos, pero no constituyen su actividad principal. Esa temporalidad puede responder a proyectos específicos de corta duración o a la planificación de actividades intensivas en determinados semestres.
- **Mínima o nula dedicación (1 mes o menos):** Indica un rol muy incipiente o de supervisión puntual.

En conjunto, se observa que algunas entidades mantienen una dedicación continua a iniciativas relacionadas con el hidrógeno verde a lo largo de la mayor parte del año, lo que refleja una consolidación de capacidades técnicas y una planificación sostenida en esta materia. Otras muestran un nivel de compromiso intermedio, mientras que un grupo menor desarrolla actividades de manera puntual o estacional. La presencia de equipos con dedicación casi exclusiva posiciona al país con varios polos activos de investigación y formación en hidrógeno verde. Sin embargo, la diferencia con aquellas instituciones que solo programan actividades esporádicas evidencia una oportunidad relevante para fortalecer la articulación entre actores, promover la continuidad operativa y aumentar la capacidad instalada en los centros que aún se encuentran en etapas iniciales de desarrollo.

Al contrastar estas planificaciones con el uso real de las instalaciones con la *Figura N°83*, se observa que solo la mitad de los centros logra emplear sus espacios exactamente según lo programado; el 43% los utiliza menos de lo previsto y un 7% incluso sobrepasa sus proyecciones anuales. Esto indica que muchas instituciones con compromisos formales de 9-12 meses acaban usando sus laboratorios y plantas piloto en menor medida, posiblemente debido a retrasos en la llegada de equipos, cambios en el financiamiento o ajustes en la agenda de proyectos. Por otro lado, ese 7% que excede lo programado refleja la existencia de proyectos que, por su complejidad o fases de

prueba en campo, requieren extender actividades más allá de los bloques de tiempo originalmente planificados.



*Figura N°83 Proporción de instituciones cuyo uso real de las instalaciones se ajusta, supera o no alcanza al tiempo programado anualmente Respuestas 14/21.*

La *Figura N°84*, se muestra que cinco instituciones desconocen sus costos anuales de mantenimiento de infraestructura destinada a I+D+i en hidrógeno verde, mientras que cuatro reportan cero gasto y solo cuatro informan montos específicos: una menos de 5.000 USD, dos entre 5.001 USD y 20.000 USD, y una alcanza el rango de 20.000 USD a 100.000 USD. Este predominio de datos no disponibles o sin asignación presupuestaria sugiere que muchas entidades aún no consolidan un registro formal de los gastos de mantenimiento, lo cual dificulta dimensionar con precisión los recursos necesarios para conservar laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba en condiciones operativas.

Al considerar este hallazgo junto con el uso real de las instalaciones, se evidencia una correlación: los centros que declaran uso inferior a lo programado (43%) o ni siquiera conocen sus costos de mantenimiento, corren el riesgo de subutilizar sus espacios técnicos y de no prever partidas destinadas a reparaciones, calibraciones o reposición de componentes. Por el contrario, aquellos pocos que asignan montos entre 5.001 USD y 100.000 USD muestran una mayor formalización en la gestión de infraestructura, lo que probablemente les permita extender el tiempo de uso efectivo y reducir brechas entre lo planificado y lo ejecutado. En síntesis, la falta de información y la ausencia de presupuestos asignados a mantenimiento refuerzan la necesidad de mejorar la planificación financiera y operacional, de modo que el tiempo de ocupación de laboratorios y plantas piloto se traduzca en un aprovechamiento sostenido y en actividades de hidrógeno verde que no se vean interrumpidas por carencias de recursos para mantener la infraestructura en óptimas condiciones.

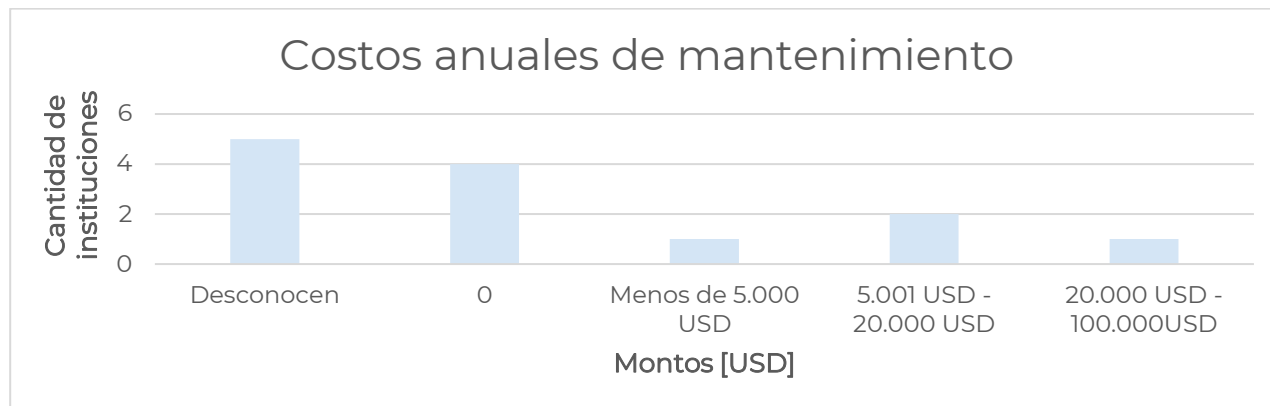


Figura N°84 Distribución del número de instituciones según el rango de costos anuales de mantenimiento. Respuestas 14/21.

Al observar cómo se distribuyen esos costos entre las distintas áreas de infraestructura, según la Figura N°85, se comprueba que, incluso cuando existe presupuesto, este se concentra en los espacios administrativos y en los espacios destinados directamente a actividades de I+D+i como laboratorios, plantas piloto y otros, luego, en menor medida en alimentación, descanso o transporte interno. El uso mayoritario de “Hasta 10.000 USD” en alimentación y descanso indica que pocas instituciones destinan montos considerables a salas de bienestar. Asimismo, aunque algunas destinan montos intermedios (de 50.001 USD a 1.000.000 USD) para oficinas, la mayoría mantiene cifras por debajo de este rango lo que dificulta las mejoras continuas.

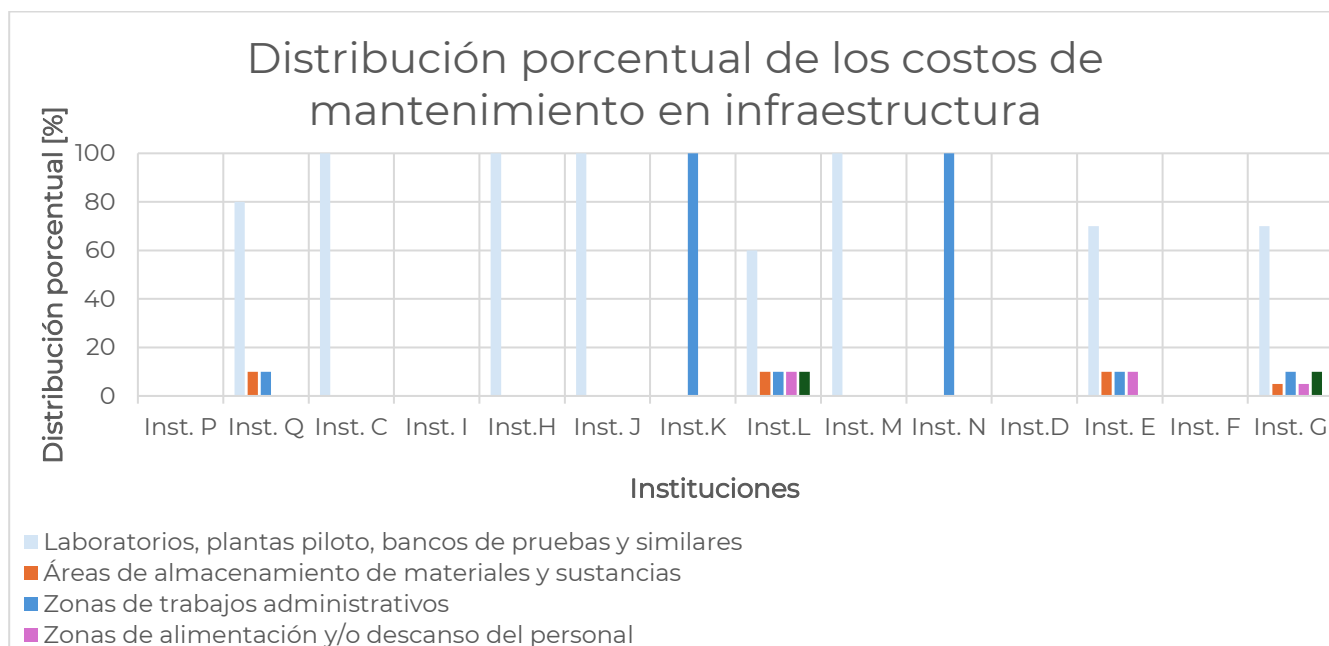


Figura N°85 Distribución porcentual detallada de los costos de mantenimiento por tipo de infraestructura y por institución dentro de distintas áreas. Respuestas 10/21. (4 instituciones sin costo de mantenimiento).

Resulta indispensable que las instituciones fortalezcan sus mecanismos de control y asignación presupuestaria, destinando partidas específicas no solo a la compra de equipos, sino también a la contratación y formación de personal técnico especializado en I+D+i. La falta de operarios y técnicos de mantenimiento, señalada en la sección dedicada a recursos humanos, impide que los laboratorios y bancos de prueba alcancen su máxima capacidad operativa.

De igual modo, sistematizar el registro de costos de mantenimiento y consolidar indicadores de uso facilitarán ajustar la planificación anual, prevenir paradas no previstas por fallas y evitar los periodos prolongados de subutilización mostrados en esta sección. Solo con estos pasos se garantizará que la infraestructura de I+D+i en hidrógeno verde se mantenga operativa, eficiente y respaldada por un equipo técnico capacitado, de modo que las instituciones puedan responder a las demandas crecientes de una industria en rápida expansión.

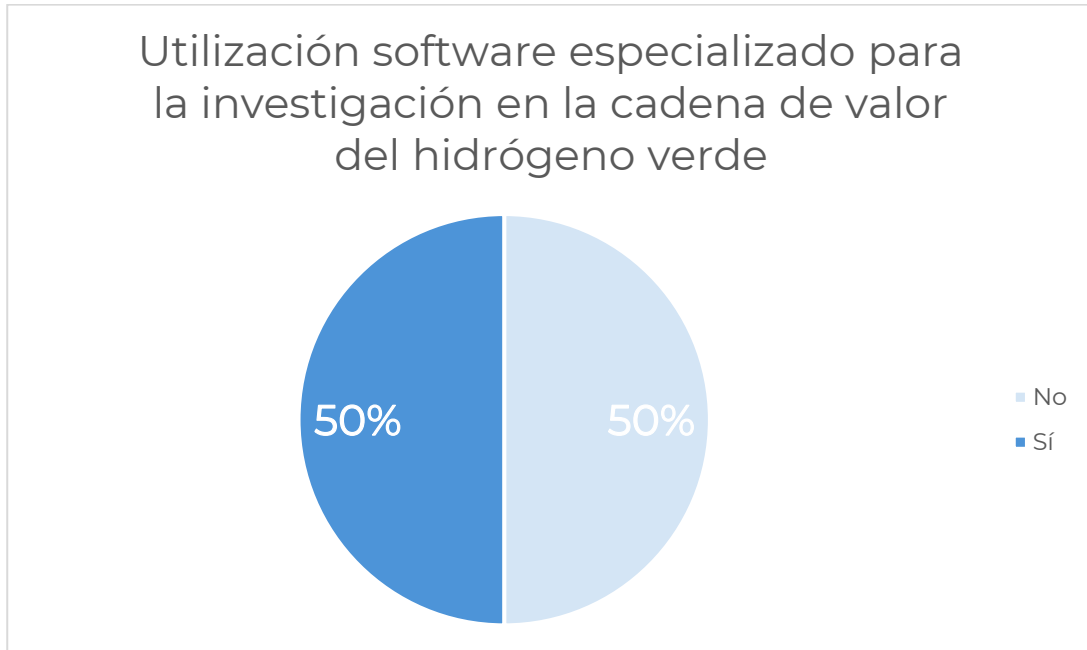
## 4.4.2 Equipamiento de los centros de I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del equipamiento disponible en las instituciones nacionales de investigación, desarrollo e innovación vinculadas al hidrógeno verde y sus derivados. El análisis abarca los tipos de equipos utilizados en las distintas etapas de la cadena de valor, tales como producción, acondicionamiento, almacenamiento, uso final y experimentación científica. Se consideran aspectos como su nivel de especialización, origen y disponibilidad para proyectos de I+D+i. Esta información permite identificar fortalezas, vacíos tecnológicos y necesidades prioritarias en materia de equipamiento científico y tecnológico, elementos clave para el desarrollo de soluciones aplicadas, la validación de tecnologías y la consolidación del ecosistema nacional de hidrógeno verde.

### 4.4.2.1 Equipamiento digital de los centros I+D+i

Esta sección aborda el uso de plataformas digitales, sistemas de información y soluciones de software empleadas por las instituciones analizadas en el marco de sus actividades vinculadas al hidrógeno verde. El objetivo es caracterizar el tipo de herramientas tecnológicas utilizadas para la modelación de procesos, simulación operativa, análisis de datos, control de equipamiento, trazabilidad y gestión de proyectos.

La adopción de herramientas informáticas especializadas constituye un factor clave para potenciar las capacidades de investigación en la cadena de valor del hidrógeno verde. Como muestra la *Figura N°86*, la mitad de las instituciones encuestadas no cuenta con software específico para esta área, mientras que el otro 50% sí dispone de licencias o plataformas dedicadas. Esta división indica que, si bien existen polos de excelencia dotados de software avanzado, aún persiste un núcleo significativo de centros que no ha incorporado estas soluciones en sus procesos de trabajo.



*Figura N°86 Porcentaje de instituciones que emplean herramientas digitales avanzadas para investigación en la cadena de valor del hidrógeno verde. Respuestas 14/21.*

Para profundizar en la naturaleza de las aplicaciones implementadas, la *Figura N°87*, desglosa los tipos de software utilizados por aquellas instituciones que sí han invertido en herramientas digitales. Se observa que seis centros emplean software de simulación de procesos, lo cual refleja la necesidad de estudiar el control y síntesis de derivados y balance energético en tiempo real, entre otras. En segundo lugar, cinco instituciones utilizan “Software para adquisición de datos”, evidenciando que gran parte de los laboratorios depende de sistemas para recolectar información de sensores, registrar variables operativas y garantizar trazabilidad de experimentos. Otros cuatro centros aprovechan programas de “Diseño y modelado 3D, estas herramientas pueden ser empleadas, para dimensionar plantas piloto o prototipos de celdas de combustible, la misma cantidad utiliza herramientas de “Gestión de proyectos y análisis de datos”, por ejemplo para coordinar tareas, asignar recursos y procesar grandes volúmenes de información experimental y “Supervisión y control de sistemas” con aplicaciones tipo SCADA o similares que permiten monitorear instalaciones en tiempo real. Finalmente, solo una institución reporta el uso de software clasificado como “Otros”, lo que podría referirse a aplicaciones específicas de nicho, como entornos de inteligencia artificial o bibliotecas de química computacional.

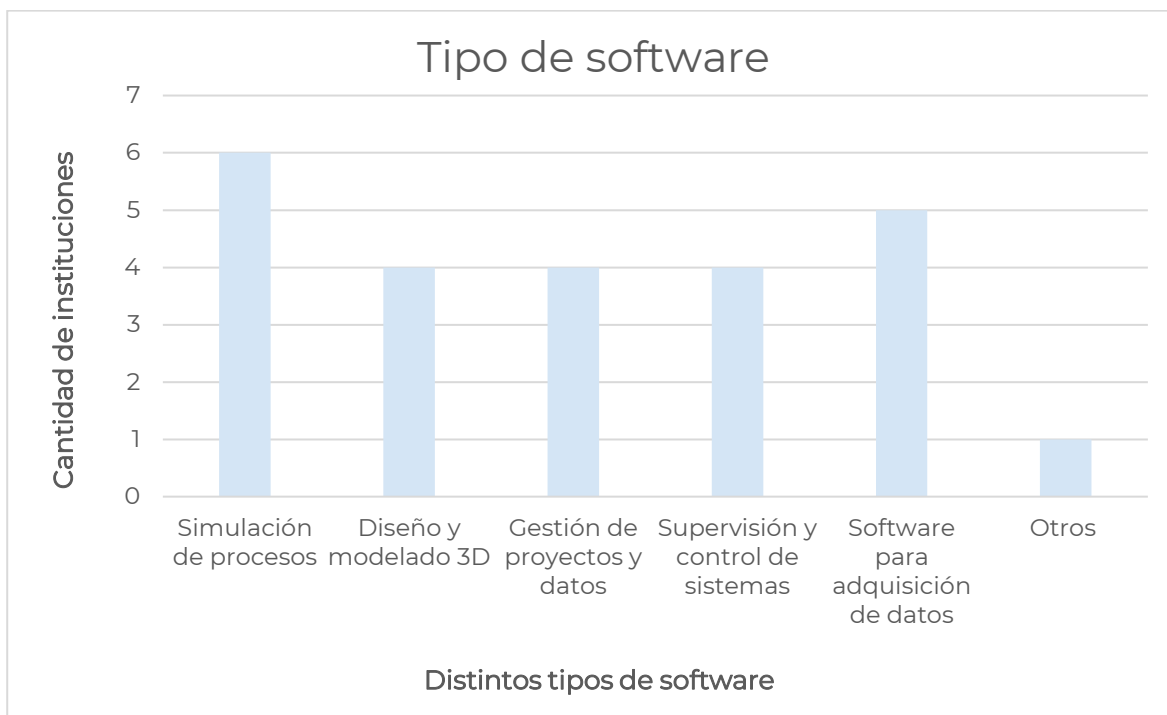


Figura N°87 Número de instituciones que emplean cada categoría la utilización de software especializado en la investigación de la cadena de valor del hidrógeno verde. Respuestas 7/21.

A continuación, en la *Tabla N°19*, se presentan los resultados respecto al propósito para el cual los centros I+D+i utilizan su equipamiento digital.

Tabla N°19 Propósito para el cual los centros I+D+i utilizan su equipamiento digital. Respuestas 6/21.

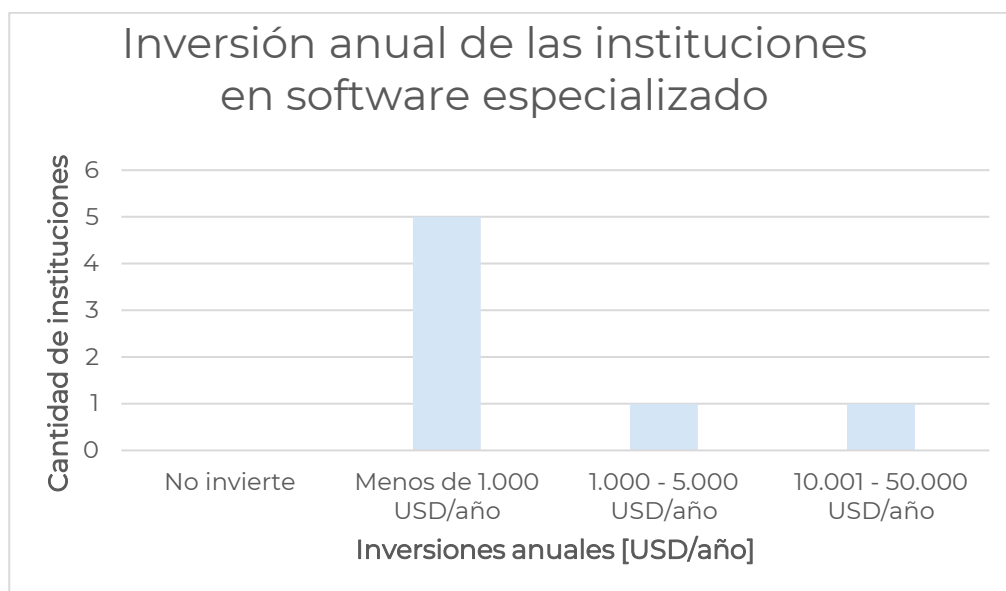
N°	Propósito de uso del software
1	Simulación de procesos químicos para la síntesis de hidrógeno y derivados, cuantificación de fuentes energéticas, planificación y optimización de sistemas de producción de hidrógeno.
2	Simulación de procesos, levantamiento de data de procesos de generación y uso de hidrógeno verde
3	Modelación, simulación de procesos, análisis de datos, control de proyectos
4	Diseño
5	Diseño de quemadores y sistemas auxiliares, recopilación de datos, y estudio numérico de los procesos de combustión
6	Diseño de planta, con AutoCAD. Determinación del Lay-Out.

La convergencia entre modelación, simulación, adquisición de datos y control de proyectos, refleja que los investigadores requieren entornos que integren la recolección automática de información con análisis numérico y herramientas de seguimiento de hitos, de modo que las decisiones se tomen sobre la base de datos empíricos y realimentación inmediata. En conjunto, la variedad de propósitos indica que los centros de I+D+i buscan ir más allá de la experimentación puntual, construyendo una infraestructura digital capaz de soportar ciclos iterativos de optimización, reducir tiempos de desarrollo y mitigar riesgos operativos.

El análisis de las aplicaciones de software especializado confirma que la investigación en hidrógeno verde exige entornos digitales robustos para modelar procesos complejos, gestionar datos experimentales y planificar instalaciones. Para fortalecer el ecosistema de I+D+i, resulta esencial que los centros que aún no cuentan con estas herramientas evalúen cuidadosamente sus necesidades técnicas y adopten las soluciones más adecuadas a su nivel de madurez. Solo de esta forma se podrá maximizar el rendimiento de los laboratorios y plantas piloto, acelerar la transferencia de resultados al sector productivo y, en definitiva, avanzar hacia una industria del hidrógeno competitivo y sostenible.

#### 4.4.2.1.1 Inversión anual en equipamiento digital

Esta sección presenta una caracterización de los niveles de inversión anual reportados por las instituciones participantes en relación con equipamiento digital, incluyendo software especializado, licencias, plataformas de simulación, sistemas de control, herramientas de análisis y otras tecnologías informáticas asociadas a procesos de I+D+i y formación. En la *Figura N°88*, se muestra la inversión anual en software especializado por parte de las instituciones encuestadas.



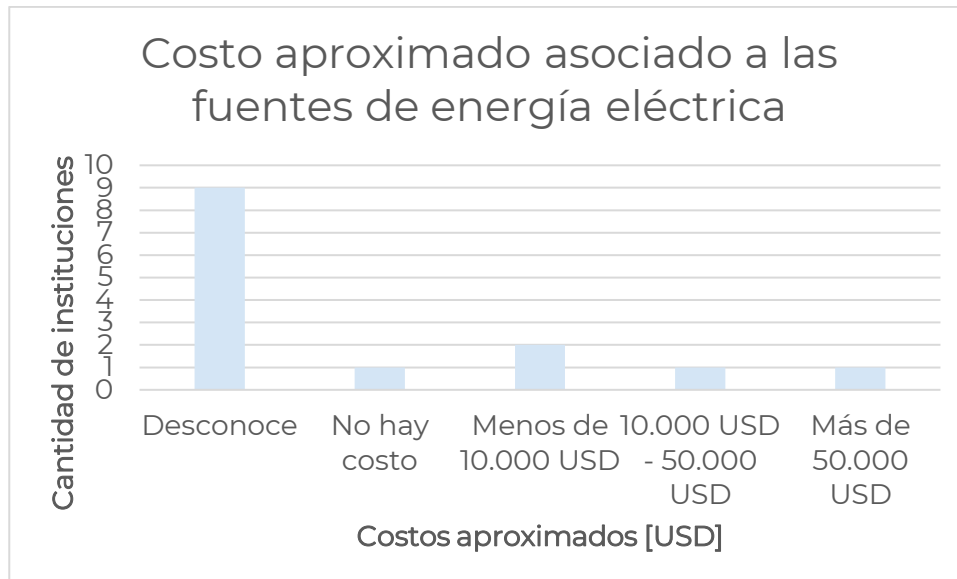
*Figura N°88 Cantidad de instituciones según el rango de inversión anual destinado a software especializado para la investigación en hidrógeno verde. Respuestas 7/21.*

La mayoría de las instituciones destina menos de 1.000 USD anuales a licencias o actualizaciones de software especializado. Solo un centro invierte entre 1.000 y 5.000 USD al año, y otro alcanza el rango de 10.001 a 50.000 USD. Ninguna institución declara no invertir, lo que indica que, aunque prácticamente todos los centros asignan algún presupuesto al software, en la mayor parte de los casos se trata de montos reducidos. Esto sugiere que, pese a reconocer la importancia de las herramientas digitales para la investigación en hidrógeno, los recursos disponibles son limitados y podrían restringir la adopción de soluciones más avanzadas o la renovación periódica de licencias.

#### 4.4.2.2 Disponibilidad de energía eléctrica de los centros I+D+i

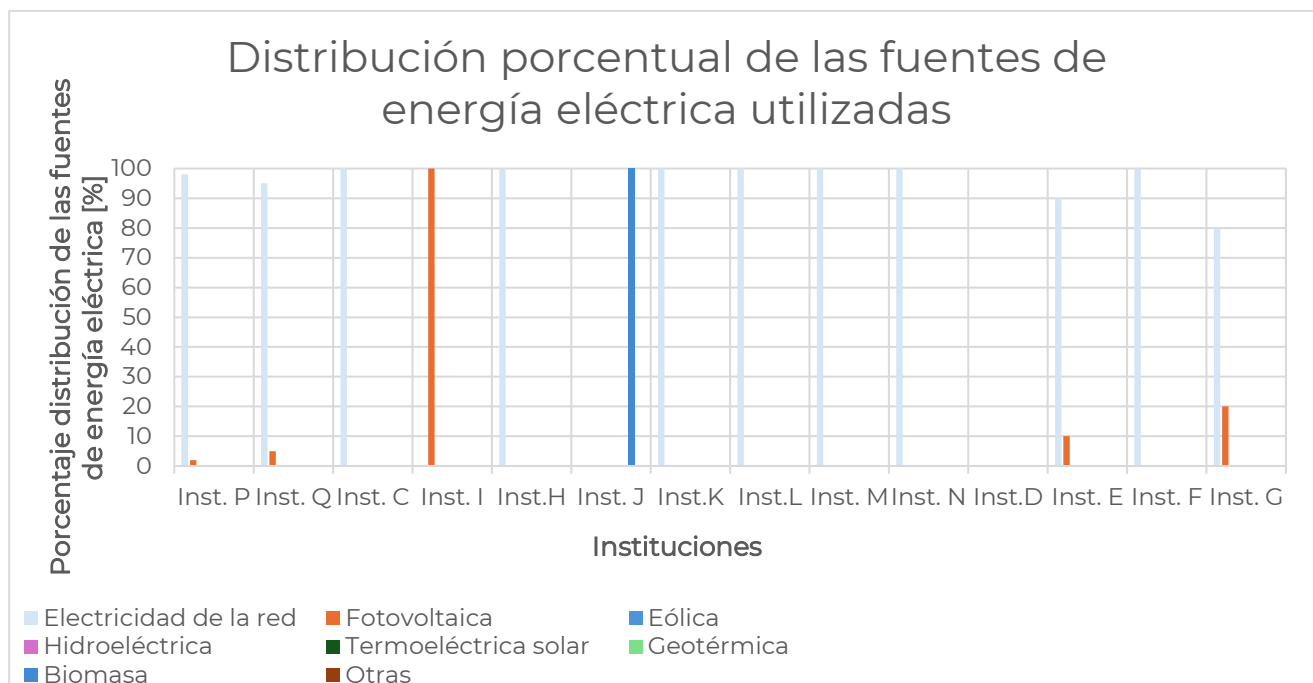
Esta sección aborda las condiciones de acceso, calidad y suficiencia de energía eléctrica en las instalaciones donde se desarrollan proyectos de investigación, desarrollo e innovación orientados a la producción de hidrógeno verde. Dado que la electrólisis es el principal proceso tecnológico para obtener hidrógeno a partir de fuentes renovables, la disponibilidad de energía eléctrica representa un factor habilitante crítico para la viabilidad técnica y operativa de estos proyectos.

La provisión de energía eléctrica es un insumo crítico para la operación de laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba orientados al hidrógeno verde. De acuerdo con la *Figura N°89*, la mayoría de las instituciones encuestadas no dispone de información precisa sobre el costo asociado a sus fuentes eléctricas, lo cual señala una brecha en el monitoreo y registro de gastos energéticos. Solo dos centros estiman desembolsar menos de 10.000 USD al año, uno ubica su gasto entre 10.000 USD y 50.000 USD, y otro supera los 50.000 USD anuales. Esto implica que muy pocas organizaciones han calculado de manera detallada lo que destinan a energía, o bien lo hacen de forma centralizada y no lo atribuyen directamente a los proyectos de hidrógeno, lo cual puede dificultar la planificación financiera y la toma de decisiones orientadas a mejoras de eficiencia o a la incorporación de energías renovables.



*Figura N°89 Costos anuales aproximados asociados a fuentes de energía eléctrica. Respuestas 14/21.*

La *Figura N°90*, muestra la distribución porcentual detallada de las fuentes de energía eléctrica utilizadas por cada centro de I+D+i. Se confirma que once de trece instituciones dependen casi exclusivamente de la red convencional, mientras que otras instituciones reducen su participación al 90%-80%, destinando un 10%-20% al uso de fotovoltaica. En contraste, Institución W aparece con una matriz 100% basada en fotovoltaica e Institución Z muestra toda su demanda cubierta por biomasa.



*Figura N°90 Distribución porcentual de las fuentes de energía utilizadas por los centros I+D+i. Respuestas 13/21.*

El análisis de la *Figura N°91*, de promedios muestra que, en términos agregados, aproximadamente un 78% de la energía eléctrica utilizada por los centros proviene de la red convencional. La generación fotovoltaica representa alrededor de un 10%, mientras que la biomasa alcanza un 7%. Otras fuentes renovables no presentan representación significativa, lo que sugiere que su uso aún no es relevante entre las instituciones evaluadas.

Un caso particular es el de la Institución J, que opera con energía eólica. Sin embargo, no se dispone de datos que permitan conocer su proporción exacta dentro de la matriz energética de ese centro, por lo que no fue posible incluir su contribución específica en los promedios consolidados. Esta ausencia de información cuantitativa limita el análisis sobre el real aporte de la eólica en el conjunto de instituciones.

En términos prácticos, los resultados reflejan una fuerte dependencia de la electricidad de red en laboratorios y plantas piloto, especialmente en procesos intensivos como la electrólisis. Si bien se identifican esfuerzos por incorporar energía solar y biomasa, su participación aún es marginal. Para avanzar hacia una investigación en hidrógeno verde más sostenible, resulta necesario ampliar la incorporación de energías renovables y mejorar la trazabilidad del consumo energético en cada centro.

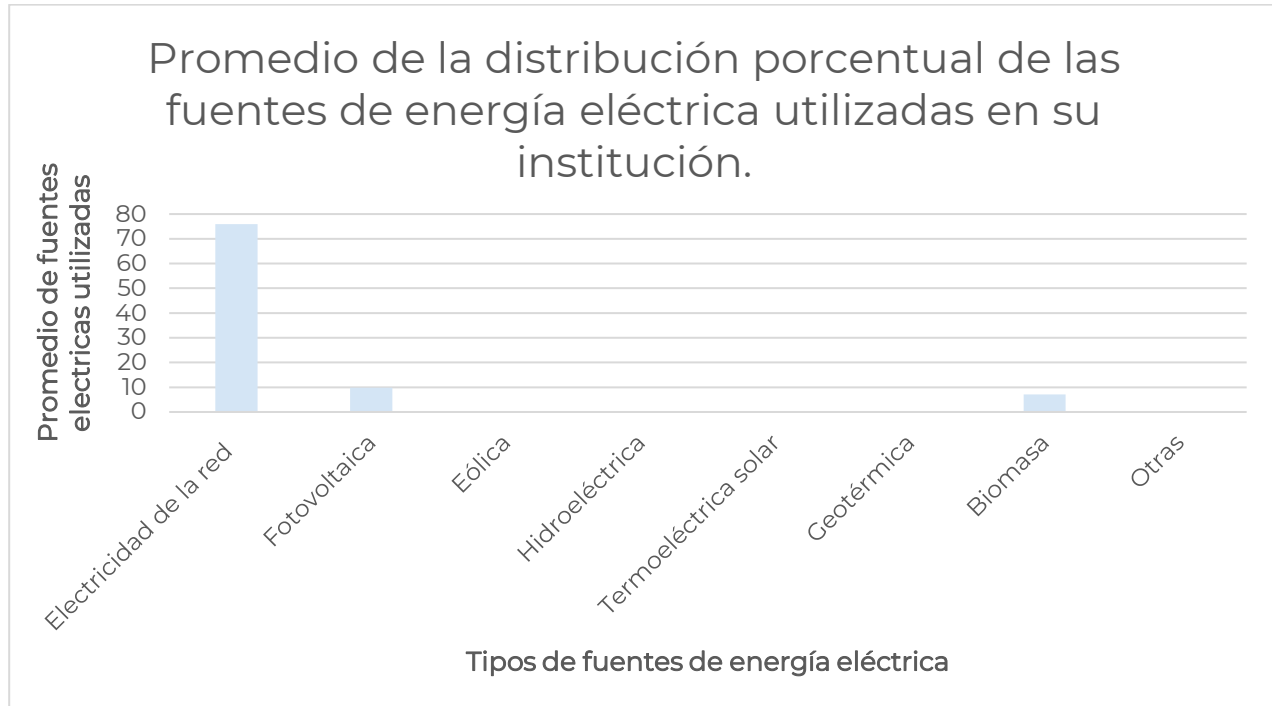


Figura N°91 Distribución promedio de las fuentes de electricidad utilizadas en las instituciones. Respuestas 13/21.

#### 4.4.2.2.1 Características de red eléctrica

En este apartado se presentan las características de la red eléctrica disponible en los centros de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) encuestados. La información levantada busca caracterizar el nivel de dependencia de estos centros respecto del sistema eléctrico nacional, así como su grado de autonomía energética, capacidad instalada propia y disponibilidad de sistemas de respaldo o almacenamiento. Estos aspectos son clave para evaluar la viabilidad técnica de desarrollar actividades vinculadas al hidrógeno verde, especialmente aquellas que requieren un suministro continuo y de alta demanda, como la electrólisis, el acondicionamiento o el uso de equipamiento analítico especializado.

Según la *Figura N°92(a)*, seis instituciones declararon no contar con capacidad instalada propia, mientras que otras cuatro no manejan información al respecto. Solo una parte menor reporta contar con alguna capacidad instalada inferior a los 1.000 kW, y únicamente dos de ellas superan los 100 kW.

Como se muestra en la *Figura N°92(b)*, la proyección a 2030 no muestra un cambio sustantivo. Aunque se incorporan casos con capacidad instalada superior a los 1.000 kW, el número de instituciones sin capacidad propia o que la desconocen sigue siendo alto. Esto indica una proyección de crecimiento débil en infraestructura energética propia, lo que podría limitar la autonomía operativa de los centros en procesos intensivos como la electrólisis.

Este escenario sugiere que, al 2025, la gran mayoría de las instituciones seguirá operando principalmente conectada a la red eléctrica nacional.

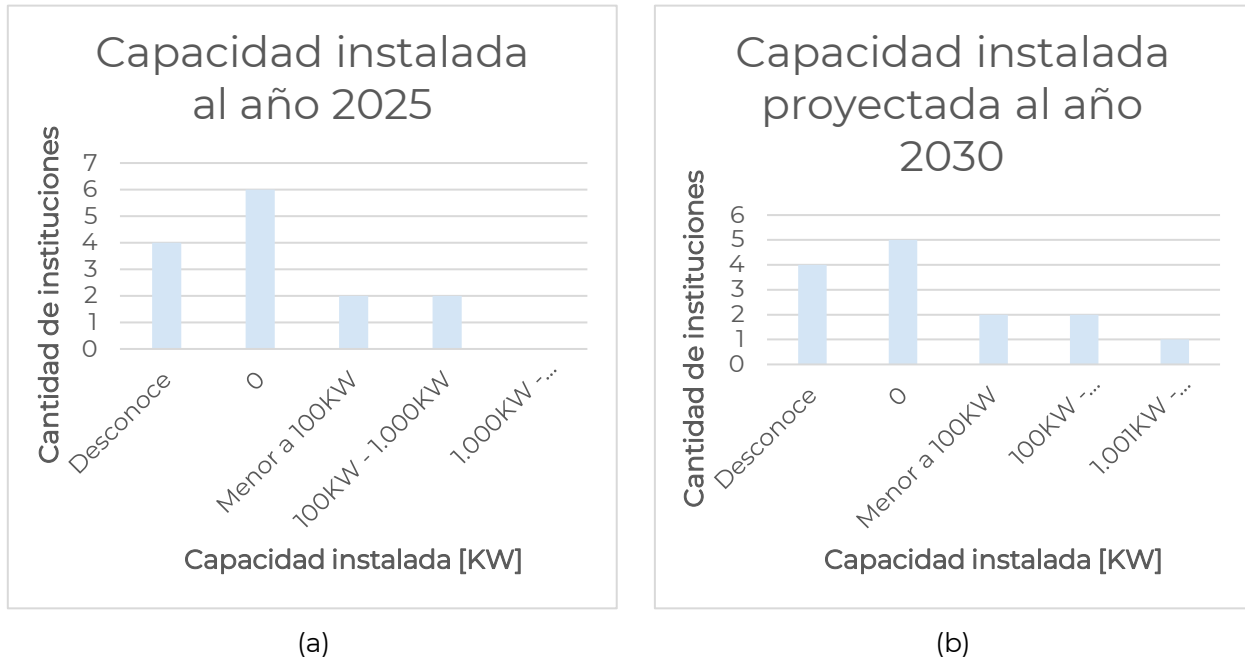


Figura N°92 Capacidad instalada actual (2025) y proyectada (2030) de las instituciones para proyectos de hidrógeno verde, expresada en kilovatios. Respuestas 14/21.

La Figura N°93, muestra que diez de las instituciones no disponen de baterías, y solo una declara tener una unidad. Tres instituciones no manejan información al respecto. La falta de almacenamiento refuerza la dependencia continua de la red, ya que sin baterías no es posible respaldar el suministro energético ante eventuales cortes o desacoples, ni almacenar energía renovable de manera eficiente.

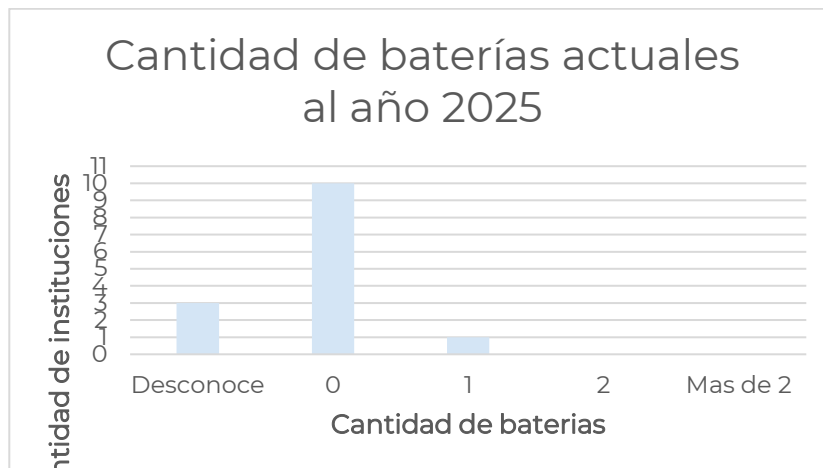


Figura N°93 Cantidad de baterías con las que cuenta el centro I+D+i en 2025. Respuestas 14/21.

#### 4.4.2.3 Equipamiento para la producción de hidrógeno verde de los centros I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del equipamiento utilizado por las instituciones analizadas en el marco de proyectos de investigación, desarrollo e innovación orientados a la producción de hidrógeno verde. Se consideran instalaciones operativas a escala de laboratorio o piloto.

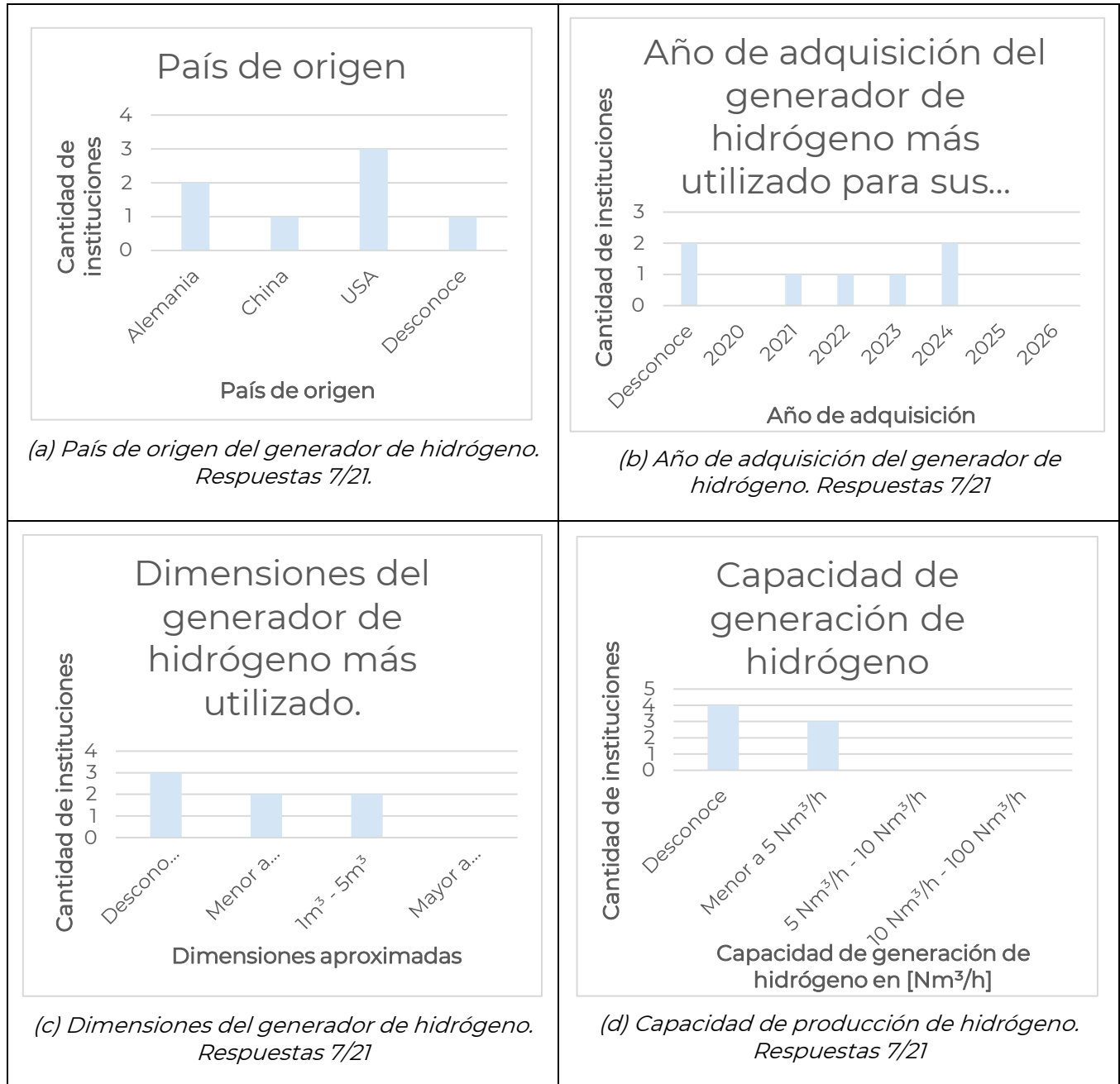
Los datos consolidados dentro de la *Tabla N°20*, muestran que solo un número muy restringido de centros dispone de tecnología de electrólisis para generar hidrógeno verde. La Figura “Tipo de electrolizador” evidencia que, de las 14 instituciones encuestadas, únicamente 2 cuentan con un equipo de electrólisis alcalina, 3 operan con electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM) y 2 disponen de sistemas de membrana de intercambio aniónico (AEM). No se registra ningún caso de electrolizadores de óxido sólido (SOEC).

*Tabla N°20 Equipamiento para la producción de hidrógeno verde en centros de investigación, desarrollo e innovación. Respuestas 14/21.*

Infraestructura y equipamiento para producción de hidrógeno verde	Valor	Frecuencia	Porcentaje
Tecnología de electrolizador <u>alcalino</u>	Sí	2	14,3%
	No	12	85,7%
Pureza del hidrógeno verde producido	Desconoce	1	50,0%
	Clase 4	1	50,0%
Equipos periféricos	Sí	1	50,0%
	No	1	50,0%
Tecnología de electrolizador <u>PEM</u>	Sí	3	21,4%
	No	11	78,6%
Pureza del hidrógeno verde producido	Desconoce	1	33,3%
	Clase 5	2	66,6%
Equipos periféricos	Sí	1	33,3%
	No	2	66,7%
Tecnología de electrolizador <u>SOEC</u>	Sí	0	0,0%
	No	14	100,0%
Tecnología de electrolizador <u>AEM</u>	Sí	2	14,3%
	No	12	85,7%
Pureza del hidrógeno verde producido	Clase 5	2	100,0%
Equipos periféricos	Sí	0	0,0%
	No	12	100,0%

La *Tabla N°21*, muestra las características generales de los electrolizadores registrados por los centros de I+D+i, incluyendo su país de origen, año de adquisición, dimensiones y capacidad de producción.

*Tabla N°21 Características generales de los generadores de hidrógeno con los que cuentan los centros I+D+i encuestados. Gráficos 4.*



Cuando se examinan los costos asociados a los electrolizadores *Figura N°94*, se observa que cuatro centros han invertido entre 50.000 USD y 500.000 USD en su equipo de generación de hidrógeno.

Esto corresponde probablemente a adquisiciones de escala piloto, incluyendo los sistemas y equipos periféricos. Un único caso reporta un desembolso en el rango de 1.000.000 USD a 10.000.000 USD, lo que sugiere la implementación de un sistema de mayor envergadura, ya sea con capacidad para producción continua a escala semi industrial o con integración piloto de múltiples celdas en cascada. Adicionalmente, dos instituciones desconocen o no han cuantificado el costo total de su electrolizador, lo que coincide con la falta de registro formal de gastos que hemos identificado en otras secciones del informe.

Este panorama arroja varias conclusiones relevantes. Primero, la limitada cantidad de electrolizadores disponibles implica que la mayoría de los centros debe recurrir a proveedores externos de hidrógeno verde o a colaboraciones puntuales con laboratorios que sí tengan capacidad de producción. Segundo, los rangos de inversión muestran que las instituciones que sí han adquirido equipos han destinado montos acordes a una fase de validación de prototipos y pruebas de concepto, pero muy pocos han escalado hacia sistemas de denominación industrial o semiindustrial. En tercer lugar, la falta de datos claros en dos casos subraya nuevamente la necesidad de sistematizar la planificación presupuestaria y el monitoreo de costos, tal como se destacó en la sección correspondiente de mantenimiento de infraestructura. Finalmente, es importante destacar que todos los electrolizadores identificados se encuentran en capacidad práctica de operar, sin embargo, como se mencionó en secciones anteriores, solo tres de los siete electrolizadores identificados cuentan con autorización SEC para operar.

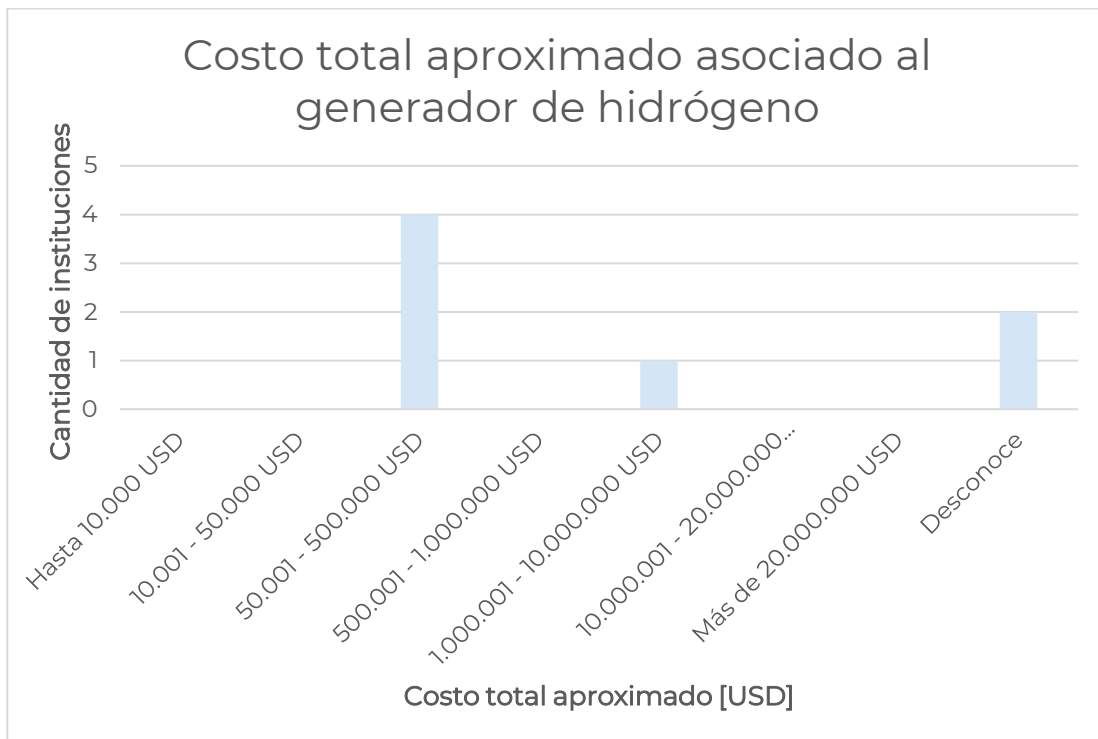
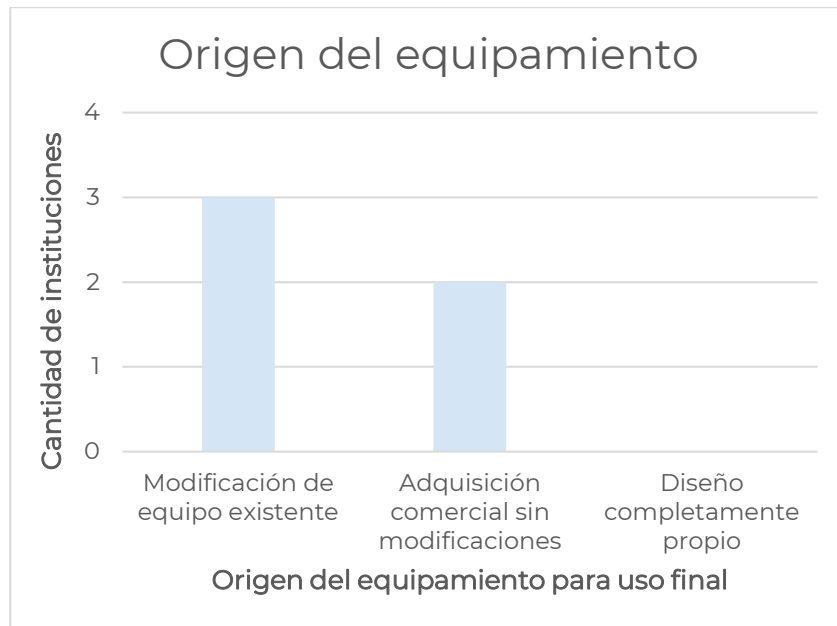


Figura N°94 Distribución de instituciones según el rango aproximado de inversión total en su sistema de generación de hidrógeno. Respuestas 7/21.

En la *Figura N°95*, se observa que, respecto al origen del equipamiento utilizado para la producción de hidrógeno verde, tres instituciones optaron por adaptar o modificar equipos ya disponibles en sus laboratorios o plantas piloto, mientras que otras dos adquirieron sistemas de electrólisis a través del mercado, sin realizarles modificaciones adicionales. Esta última modalidad refleja una preferencia por equipos validados comercialmente, lo que permite a los centros enfocar sus esfuerzos en el desarrollo de protocolos de prueba, operación y análisis, sin incurrir en procesos de rediseño o adecuación técnica. Por otro lado, la adaptación de equipamiento existente indica una estrategia orientada a optimizar recursos disponibles y a generar soluciones personalizadas en función de las capacidades técnicas internas y generar instancias de I+D+i con los equipos disponibles.



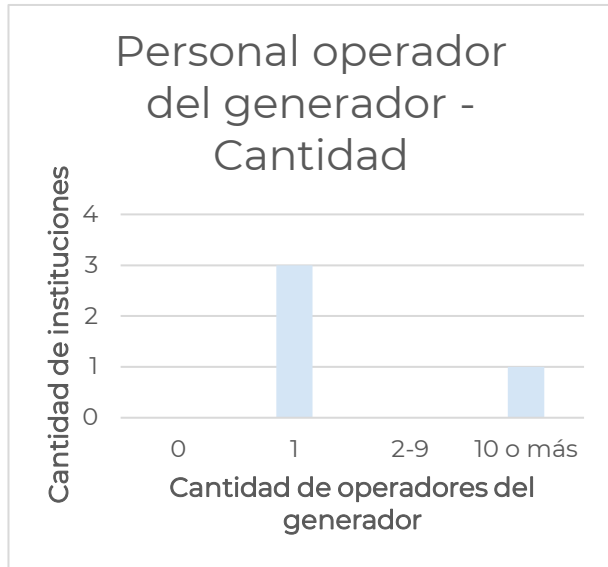
*Figura N°95 Origen y condiciones del equipo generador de hidrógeno. Respuestas 5/21.*

#### 4.4.2.3.1 Personal operador - Producción de hidrógeno verde

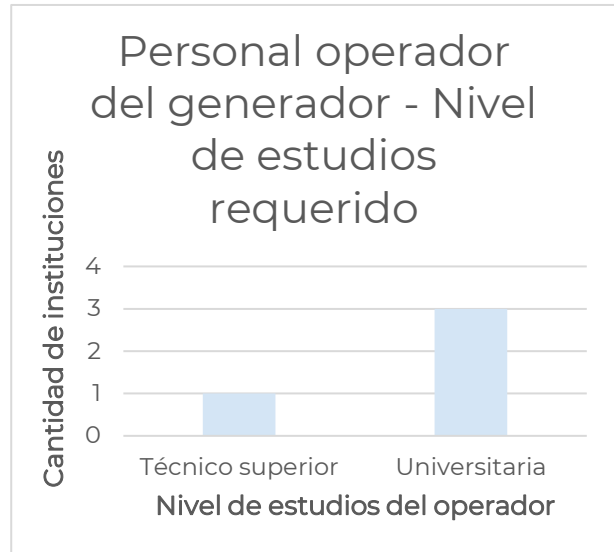
Este subapartado describe las funciones y niveles de especialización del personal operador encargado de la manipulación directa del equipamiento utilizado en proyectos con producción de hidrógeno verde.

En la *Tabla N°22* se puede observar que la operación de generadores de hidrógeno verde recae mayoritariamente en un único operador por institución, generalmente con estudios universitarios y en el rango de 20-29 años, mientras que la participación femenina es escasa. Esta concentración de responsabilidad dificulta la disponibilidad horaria y la transición de conocimientos, por lo que se recomienda aumentar el número de operadores, promover la formación de técnicos y fomentar la inclusión de mujeres en los equipos.

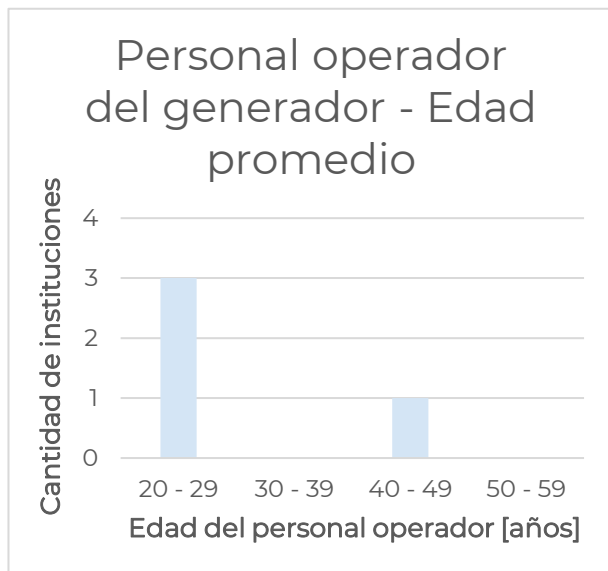
*Tabla N°22 Características generales del personal operador del equipo para producción de hidrógeno. Gráficos 4.*



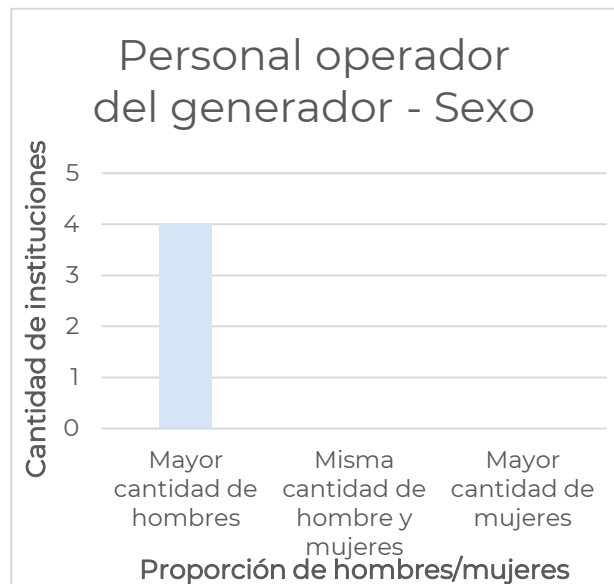
(a) Distribución del número de operadores asignados al generador de hidrógeno en cada institución Respuestas 4/21



(b) Nivel de estudios requeridos para el personal operador del generador de hidrógeno en cada institución Respuestas 4/21



(c) Rango de edad del personal operador de generador de hidrógeno en cada institución Respuestas 4/21



(d) Proporción de género del personal operador del generador de hidrógeno en cada institución Respuestas 4/21

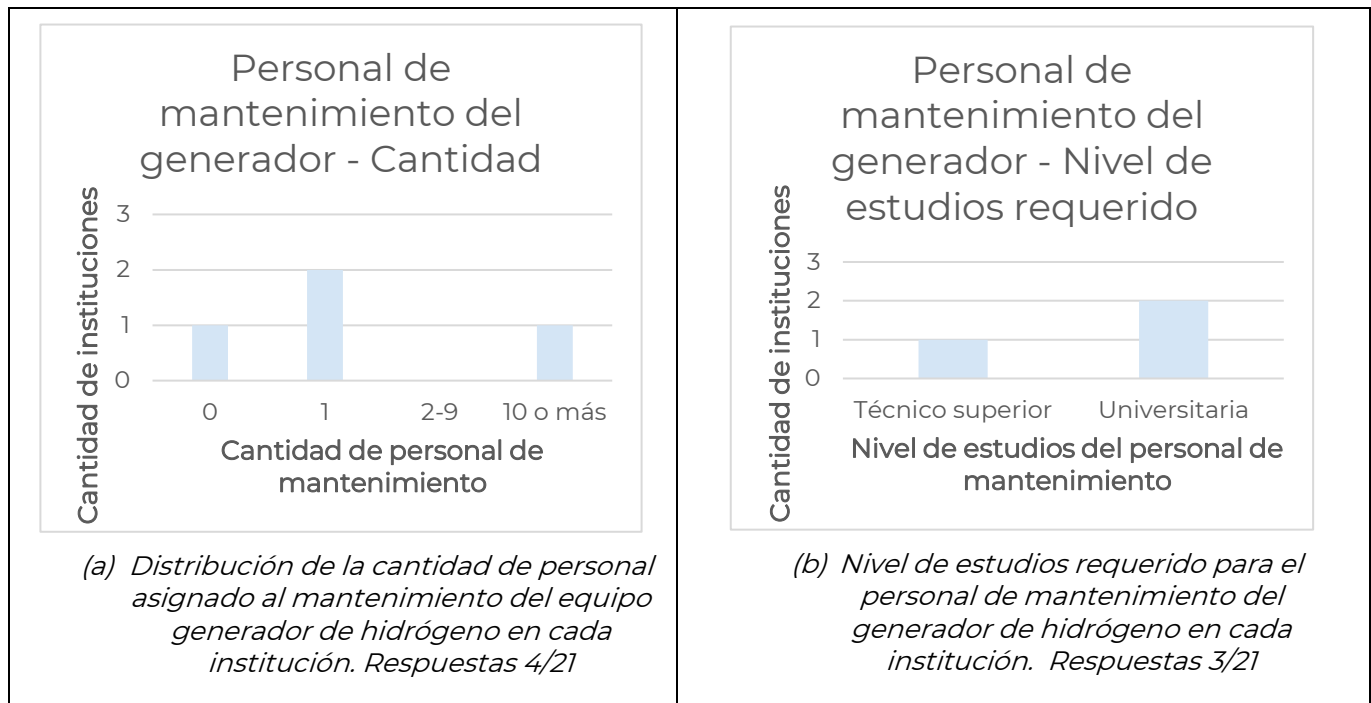
#### 4.4.2.3.2 Personal mantenedor - Producción de hidrógeno verde

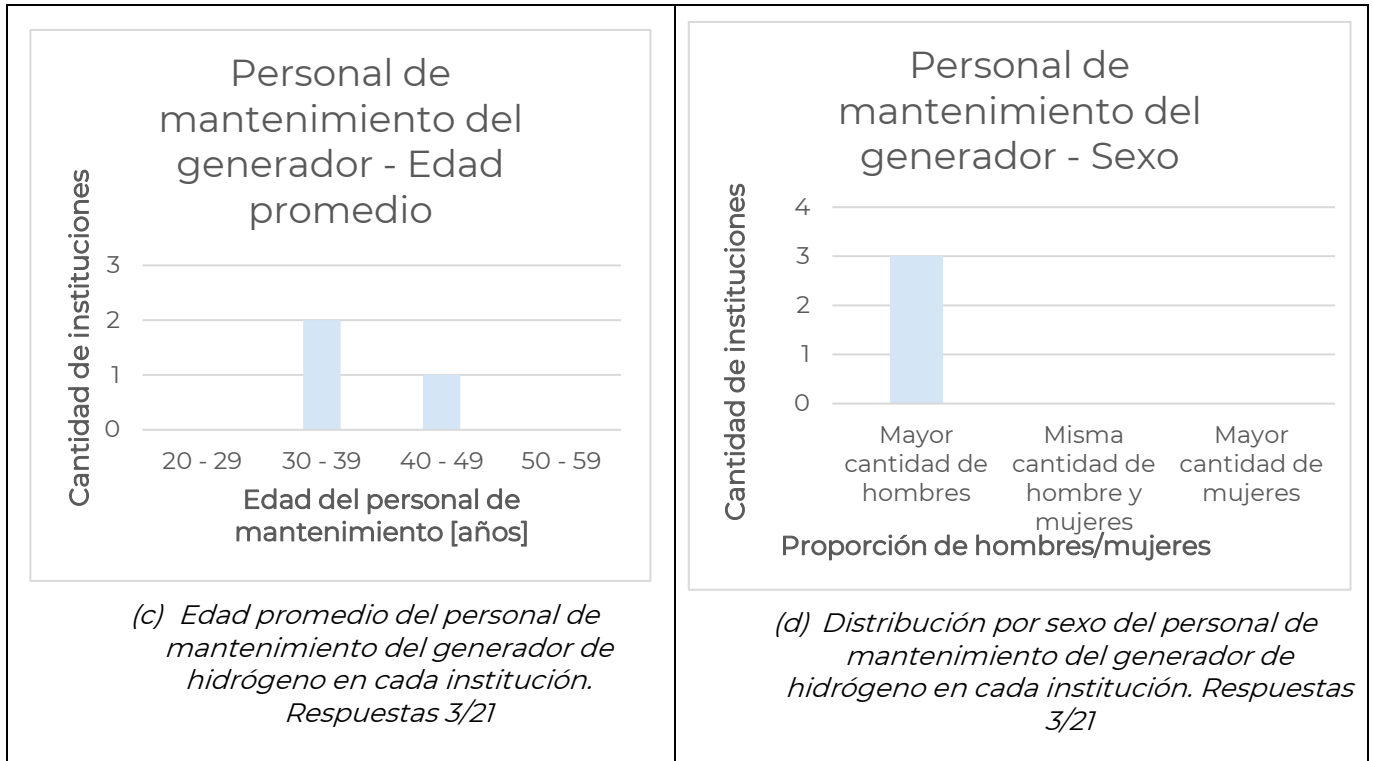
Este subapartado describe las funciones y niveles de especialización del personal mantenedor encargado de la mantención del equipamiento utilizado en proyectos con producción de hidrógeno verde.

El análisis realizado en la

Tabla N°23, muestra que la mayoría de las instituciones cuenta con muy pocos (o ningún) técnico dedicado al mantenimiento de generadores hidrógeno verde, generalmente de nivel universitario y con edades entre 30 y 49 años, predominando los hombres. Esta escasez y falta de relevo genera riesgos operativos; por ello es urgente aumentar y diversificar el equipo de soporte técnico, incorporar formación para perfiles más jóvenes y promover la inclusión de mujeres.

Tabla N°23 Características generales del personal mantenedor del equipo para producción de hidrógeno. Gráficos 4.





#### 4.4.2.3.3 Equipamiento para el tratamiento de agua para electrólisis

Este apartado presenta el equipamiento identificado para el tratamiento de agua en proyectos de electrólisis, detallando su país de origen y el costo de adquisición aproximado reportado por las instituciones encuestadas.

La *Figura N°96*, muestra que dos de las instituciones conocen el costo de su sistema de tratamiento de agua y lo sitúan en más de 100.000 USD, lo cual sugiere instalaciones de mayor escala o tecnologías avanzadas. Una tercera institución reporta un gasto inferior a 1.000 USD, probablemente porque emplea soluciones modulares o filtración básica para volúmenes pequeños. Sin embargo, la mitad de los centros desconoce por completo cuánto invierte en tratamiento de agua, lo que indica falta de registro o de priorización de esta partida.

En conjunto, estos resultados reflejan que mientras algunas instalaciones asignan recursos significativos a procesos de purificación, varias no han definido ni cuantificado esta inversión, lo que podría traducirse en riesgos operativos. Para mitigar estos riesgos, es fundamental que todas las instituciones establezcan un plan de monitoreo del consumo y calidad de agua, asignen un presupuesto mínimo (incluso en rangos modestos) y, de ser necesario, exploren soluciones compartidas o de escala comunitaria que reduzcan costos unitarios. De esta manera se garantizará la disponibilidad de agua de calidad, prolongando la vida útil de los electrolizadores y mejorando la fiabilidad de los ensayos en hidrógeno verde.

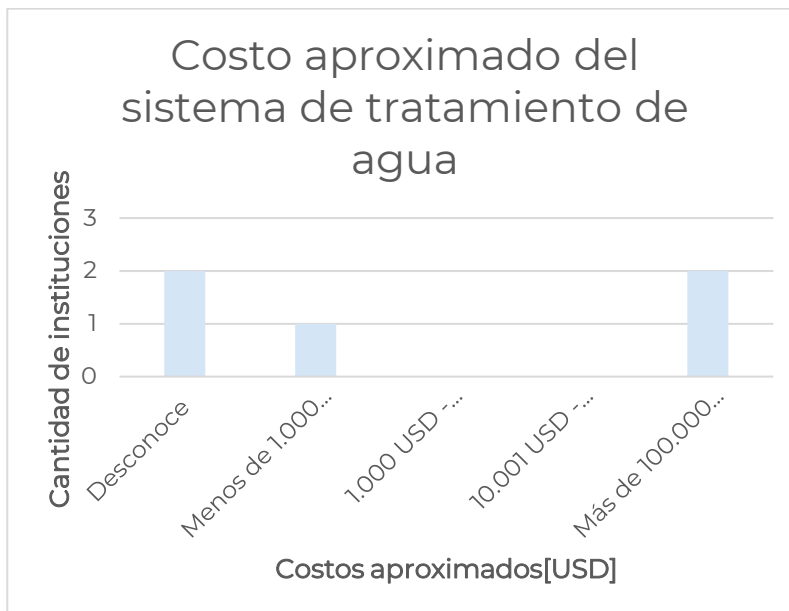


Figura N°96 Distribución de costos aproximados de los sistemas de tratamiento de agua utilizados en los generadores de hidrógeno. Respuestas 5/21.

#### 4.4.2.3.4 Equipos periféricos para generación de hidrógeno verde

Para garantizar la operación segura y eficiente de los electrolizadores destinados a la producción de hidrógeno verde, resulta indispensable contar con un conjunto de equipos periféricos específicos que complementen la función principal del módulo de electrólisis. La *Tabla N°24*, recoge los ítems asociados que las instituciones de I+D+i han reportado como parte de su infraestructura auxiliar.

Tabla N°24 Equipos periféricos asociados a producción de hidrógeno verde en instituciones de I+D+i.

Tipo de equipo	Cantidad
Secador de hidrógeno	1
Refrigeración para el electrolizador	2

En primer lugar, se evidencia una escasa incorporación de sistemas de secado de hidrógeno. Solo una institución declara contar con un secador de hidrógeno, un equipo esencial para eliminar la humedad residual del gas generado antes de su almacenamiento o utilización en aplicaciones como celdas de combustible, reactores de síntesis o sistemas analíticos. La ausencia de este componente en la mayoría de los centros implica que el hidrógeno producido puede contener trazas de vapor de agua, lo que a largo plazo podría dañar membranas, catalizadores y válvulas, además de comprometer la calidad y reproducibilidad de los ensayos. Disponer de un sistema de secado adecuado es fundamental para alcanzar purezas de clase 4 o 5, según las exigencias de cada proyecto, y para evitar corrosión o la formación de contaminantes en las etapas posteriores del proceso.

En segundo lugar, se identifica una limitada disponibilidad de sistemas de refrigeración específicos para electrolizadores. Solo dos instituciones han integrado este tipo de solución, cuya función es mantener la temperatura de operación del electrolizador dentro de rangos óptimos, generalmente entre 20 °C y 60 °C, dependiendo de la tecnología utilizada. La gestión térmica es crítica, ya que la electrólisis genera calor que, si no se disipa adecuadamente, puede provocar sobrecalentamientos, disminuir la eficiencia eléctrica y acelerar la degradación de los componentes internos del sistema, como electrodos y membranas. En la mayoría de los casos, las instituciones parecen depender de mecanismos de enfriamiento general, como sistemas de aire acondicionado o ventilación de sala, los cuales no entregan el mismo nivel de control ni de intercambio térmico directo. Esto puede derivar en fluctuaciones internas de temperatura en los módulos de electrólisis, con efectos negativos en la estabilidad y el rendimiento del proceso.

La incorporación de equipamiento periférico especializado sigue siendo muy limitada dentro del ecosistema nacional de I+D+i en hidrógeno verde. La existencia de un único secador de hidrógeno y de apenas dos sistemas de refrigeración dedicados refleja una brecha significativa en la infraestructura técnica de apoyo. Para mejorar la confiabilidad y repetibilidad de los ensayos, se recomienda que todas las instituciones que operan sistemas de electrólisis evalúen la instalación de columnas de secado, sobre todo en los que se realicen pruebas con celdas de combustible, y sistemas de refrigeración dedicados, ya sea mediante circuitos de agua helada o soluciones retráctiles por aire, adaptadas a la escala de operación. Esta mejora permitirá asegurar que el hidrógeno cumpla con los estándares de pureza requeridos y que los electrolizadores funcionen bajo condiciones térmicas estables, lo que contribuirá a reducir el desgaste de los componentes y a extender la vida útil de los equipos.

#### 4.4.2.4 Equipamiento para el acondicionamiento de hidrógeno verde de los centros I+D+i

Este apartado presenta el equipamiento identificado en las instituciones para el acondicionamiento de hidrógeno verde en el marco de proyectos de investigación, desarrollo e innovación. Se considera como equipamiento de acondicionamiento a aquellos sistemas utilizados para compresión, secado, purificación o enfriamiento del gas, necesarios para ajustar sus condiciones a los estándares técnicos requeridos en almacenamiento, transporte o aplicación.

De acuerdo con los datos recopilados, solo tres instituciones reportaron contar con esta categoría de equipamiento, específicamente compresores o boosters destinados al manejo de hidrógeno. Aunque el número de casos es limitado, la información permite caracterizar parcialmente las capacidades actuales del sistema de I+D+i en esta materia. Como se observa en la *Tabla N°25*, dos de las tres instituciones ya cuentan con sistemas operativos y adquiridos en 2024, provenientes de China e Italia, mientras que una tercera aún se encuentra en proceso de adquisición.

Tabla N°25 Resumen de características principales del equipamiento para acondicionamiento de los centros encuestados. Respuestas 3/3.

Nº	Año de adquisición	País de origen	Dimensiones aproximadas [cm]	Capacidad de acondicionamiento [Nm <sup>3</sup> ]	Presión de trabajo [bar]
1	Por adquirir	Desconoce	Desconoce	Desconoce	Desconoce
2	2024	China	150*150*150	Desconoce	400
3	2024	Italia	100x100x100	9,30	200

En cuanto a la presión de trabajo, uno de los equipos opera a 400 bar y otro a 200 bar, lo que indica que ambos sistemas son aptos para procesos de almacenamiento presurizado o integración con dispensadores de hidrógeno.

Además, dos de estas instituciones declararon que el costo de adquisición del sistema de acondicionamiento se encuentra en el rango de 10.000 a 50.000 USD, lo que entrega una referencia preliminar sobre la magnitud de inversión requerida para este tipo de tecnología en contextos de laboratorio o planta piloto.

Si bien el número de centros que actualmente dispone de equipamiento para acondicionamiento de hidrógeno es reducido, los datos permiten inferir que al menos una parte del ecosistema nacional ya ha comenzado a integrar soluciones específicas para cumplir con estándares de presión y calidad requeridos en el manejo del gas. Sin embargo, la escasa trazabilidad sobre variables técnicas clave, como capacidad de acondicionamiento y características detalladas del sistema, sugiere la necesidad de mejorar los mecanismos de registro y sistematización, especialmente considerando la importancia de estos equipos para garantizar la seguridad operativa y la eficiencia de los procesos asociados al hidrógeno verde.

#### 4.4.2.4.1 Personal operador - Acondicionamiento de hidrógeno verde

Las instituciones que reportaron contar con equipamiento para el acondicionamiento de hidrógeno indicaron que este es operado, en todos los casos, por una sola persona. El perfil del operador corresponde mayoritariamente a hombres jóvenes, con un rango de edad entre 20 y 29 años, que cuentan con formación universitaria.

#### 4.4.2.4.2 Personal mantenedor - Acondicionamiento de hidrógeno verde

Respecto al mantenimiento del equipamiento para el acondicionamiento de hidrógeno, sólo una de las instituciones encuestadas reportó contar con personal específico para esta función. Se trata de un profesional con formación universitaria, hombre, y con una edad entre 30 y 39 años. En contraste, otra institución indicó que, si bien dispone de un compresor, no cuenta con personal encargado de su mantenimiento, lo que podría comprometer la operatividad y seguridad del equipo ante eventuales fallas o requerimientos técnicos. Esta situación evidencia una brecha en la gestión del mantenimiento especializado para equipos críticos dentro de los proyectos de I+D+i en hidrógeno verde.

#### 4.4.2.5 Equipamiento para el almacenamiento de hidrógeno verde y derivados de los centros I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del equipamiento utilizado para el almacenamiento de hidrógeno verde y sus derivados en instituciones que desarrollan proyectos de investigación, desarrollo e innovación. Se analizan las tecnologías disponibles, su escala de operación, condiciones técnicas y niveles de uso, considerando tanto soluciones de almacenamiento directo como aquellas orientadas a compuestos derivados. La información mostrada en la *Tabla N°26*, permite identificar capacidades instaladas, características generales y principales brechas para el desarrollo experimental y la validación tecnológica en esta etapa de la cadena de valor.

La *Tabla N°26*, presenta los sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido implementados en cuatro centros de investigación, desarrollo e innovación entre 2021 y 2024. Uno de ellos optó por un diseño de fabricación local en 2021, mientras que los restantes incorporaron equipos importados de origen asiático en años recientes. Los sistemas difieren tanto en capacidad como en nivel de presión: uno de los equipos permite almacenar 30 kg a 30 bar, priorizando el volumen sobre la compresión; otro opera con 10 kg a 400 bar en un cilindro de 200×50 cm, optimizando la densidad de almacenamiento; y un tercero almacena 2,83 kg a 200 bar en un tanque de 150×40 cm, configurado para ensayos experimentales de corta duración. En conjunto, estas configuraciones reflejan distintas estrategias de almacenamiento según el propósito de uso, las condiciones de seguridad y las capacidades técnicas de cada instalación.

*Tabla N°26 Resumen de características principales del equipamiento destinado para el almacenamiento de las instituciones con proyectos I+D+i. Instituciones 4.*

Instituciones	Inst. Q	Inst. I	Inst. H	Inst. G
Tipo de almacenamiento	Gas comprimido	Gas comprimido	Gas comprimido	Gas comprimido
Año de adquisición	2024	2024	2021	2024
País de origen	China	Corea	Chile	Corea
Dimensiones aproximadas en [cm x cm x cm]	200*50*50	Desconoce	Desconoce	150x40x40
Capacidad de almacenamiento de hidrógeno o derivados [kg]	10	30	Desconoce	2,83
Temperatura de trabajo [K]	298	Desconoce	Desconoce	293
Presión de trabajo [bar]	400	30	180	200
Costo aproximado de adquisición [USD]	15.000	Desconoce	Desconoce	6.500

Sólo Institución Q e Institución G informaron sus costos de adquisición, lo que refleja la combinación entre capacidad, presión de trabajo y materiales empleados. Institución I e Institución H no proporcionaron cifras, lo que dificulta estimar su inversión, aunque se infiere que el tanque de 30 kg a 30 bar implica un desembolso intermedio. Además, la mayoría opera en condiciones de

temperatura ambiente (293-298 K), simplificando el manejo térmico, pero la amplia variabilidad de presiones, 30 bar a 400 bar implica distintos requisitos de seguridad y compresión.

Ningún centro reportó sistemas de medición de pureza ni filtros posteriores al almacenamiento, lo cual puede comprometer la calidad del hidrógeno verde para aplicaciones sensibles como celdas de combustible o síntesis catalítica. Asimismo, la dependencia de proveedores internacionales subraya la necesidad de fortalecer capacidades locales de diseño y certificación. Para garantizar la continuidad operativa y la fiabilidad de los ensayos, es imperativo que los institutos estandaricen el registro de dimensiones, capacidades y costos, y adopten analizadores de gas para certificar purezas de clase 4 o 5.

#### 4.4.2.5.1 Personal operador - Almacenamiento de hidrógeno verde

De las cuatro instituciones que reportaron contar con equipamiento para el almacenamiento de hidrógeno, solo tres indicaron disponer de personal operador. En cada una de estas tres instituciones, el equipamiento es operado por una sola persona. En todos los casos, el personal operador posee formación universitaria, presenta un rango de edad entre los 20 y 39 años, y corresponde al sexo masculino. Este perfil evidencia una dotación limitada y concentrada, lo que podría representar una restricción operativa en caso de contingencias o requerimientos de funcionamiento extendido, especialmente considerando las exigencias técnicas y de seguridad asociadas al almacenamiento de hidrógeno y sus derivados.

#### 4.4.2.5.2 Personal mantenedor - Almacenamiento de hidrógeno verde

De las cuatro instituciones que reportaron contar con equipamiento para el almacenamiento de hidrógeno, dos indicaron disponer de personal encargado de su mantenimiento. En ambos casos, se trata de una sola persona por institución. El personal de mantenimiento cuenta con formación universitaria, presenta una edad promedio entre los 30 y 39 años, y corresponde al sexo masculino. Esta configuración refleja una dotación mínima y especializada, lo que puede ser adecuado para la escala actual de operación, pero que también plantea desafíos en términos de continuidad operativa, gestión del riesgo y disponibilidad de reemplazo ante eventuales contingencias técnicas.

#### 4.4.2.6 Equipamiento para la producción de derivados de hidrógeno de los centros I+D+i

Este apartado aborda la existencia, o en este caso, la ausencia de infraestructura tecnológica dedicada a la síntesis de derivados del hidrógeno verde, tales como metanol, amoníaco u otros portadores químicos, dentro del ecosistema nacional de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Contar con esta capacidad resulta estratégico, ya que la producción de derivados constituye la etapa final de la cadena de valor del hidrógeno: no solo permite generar productos de mayor valor agregado para aplicaciones industriales y energéticas, sino que también facilita el almacenamiento, transporte y exportación del hidrógeno, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones en procesos convencionales.

Los resultados obtenidos a partir de las encuestas aplicadas indican que, actualmente, ninguna de las instituciones consultadas dispone de reactores o plantas piloto operativas destinadas a la producción de derivados químicos a partir de hidrógeno verde. Sólo una entidad señaló encontrarse en fase de

planificación para la adquisición de un sistema de síntesis de amoníaco, lo que evidencia que este ámbito aún se encuentra en una etapa incipiente dentro del país.

La falta de infraestructura para esta etapa crítica del proceso genera importantes brechas. Por una parte, la ausencia de reactores piloto impide validar tecnologías desarrolladas a escala de laboratorio, tales como catalizadores o rutas de conversión que incorporan CO<sub>2</sub> capturado, como es el caso de la síntesis de metanol. La transición desde un reactor de bancada a una unidad piloto requiere evaluar variables de operación como temperatura, presión y caudal bajo condiciones estables y continuas. Por otra parte, esta carencia también limita la formación de capital humano especializado, ya que no es posible entrenar personal técnico ni desarrollar competencias aplicadas en integración de sistemas de síntesis, control de subproductos, purificación de corrientes mixtas o gestión de seguridad operacional en estos entornos.

Pese a este escenario, existe una referencia destacada a nivel nacional, la que fue visitada para la ejecución de este estudio, la planta piloto de la Institución J, desarrollada en Punta Arenas. Esta instalación representa el único caso identificado con capacidad operativa para producir metanol sintético a partir de hidrógeno verde. En esta planta, el hidrógeno generado por electrólisis se combina con CO<sub>2</sub> capturado de fuentes biogénicas o fósiles para alimentar un reactor de metanol a escala piloto. Posteriormente, el metanol producido se convierte en e-combustibles líquidos utilizados en transporte. El proyecto ha demostrado la factibilidad técnica y operativa de esta ruta, aportando datos reales sobre eficiencia energética, comportamiento catalítico, integración de procesos y estándares de calidad para exportación.

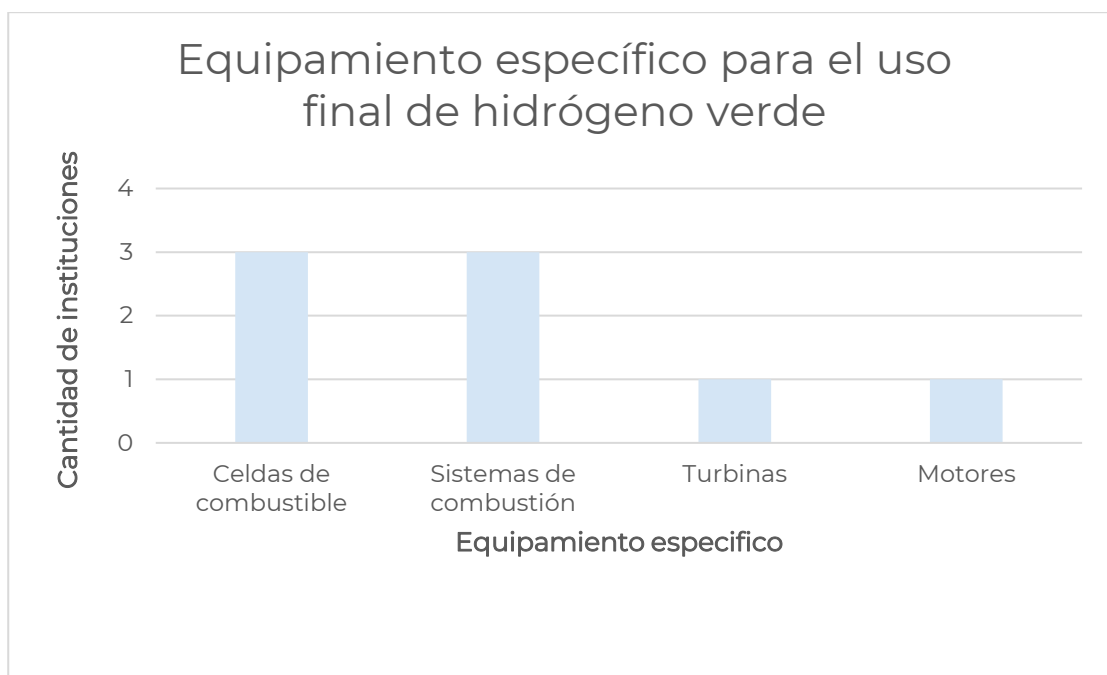
Este caso subraya la urgencia de avanzar en la incorporación de equipamiento para la síntesis de derivados en los centros de I+D+i del país. Esto es fundamental para tres objetivos: validar tecnologías en condiciones de operación continua; formar profesionales capacitados en procesos de síntesis química bajo condiciones industriales; y demostrar la viabilidad económica de la cadena completa, desde la producción de hidrógeno verde hasta su transformación en productos comercializables. Sin estas capacidades, la investigación en nuevos catalizadores, rutas de síntesis o esquemas de captura y reutilización de carbono se verá limitada a escala de laboratorio, sin posibilidad de validación técnica ni de transferencia efectiva hacia el sector productivo.

Por tanto, el fortalecimiento de esta etapa de la cadena de valor debe ser considerado prioritario si se busca posicionar a Chile como un actor relevante en el desarrollo de combustibles y químicos renovables. La disponibilidad de fuentes abundantes de energía limpia en el país ofrece una ventaja comparativa evidente, pero será necesario contar con la infraestructura tecnológica adecuada para convertir esa ventaja en soluciones de alto valor para la industria, la exportación y la generación de empleo calificado.

#### 4.4.2.7 Equipamiento para uso final de hidrógeno verde y derivados de los centros I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del equipamiento destinado al uso final del hidrógeno verde y sus derivados en los centros de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) encuestados. Se considera aquí el equipamiento que permite validar el comportamiento, eficiencia y seguridad del hidrógeno en aplicaciones reales o simuladas, incluyendo tecnologías estacionarias, de movilidad o de integración energética.

De acuerdo con la información levantada, los tipos de equipamiento identificados son diversos, aunque su presencia aún es incipiente a nivel nacional. Como se observa en la *Figura N°97*, las tecnologías más representadas corresponden a celdas de combustible, sistemas de combustión y turbinas, con tres instituciones que reportan el uso de cada una de ellas. En menor proporción, se identifican casos de motores y quemadores utilizados para validar reacciones o procesos de combustión directa con hidrógeno o derivados.



*Figura N°97 Cantidad de instituciones que cuentan con cierto equipamiento específico para el uso final del hidrógeno verde. Respuestas 9/21.*

La *Tabla N°27*, entrega un mayor nivel de detalle sobre estos equipos. Destaca la presencia de celdas de combustible en al menos tres centros, con fechas de adquisición recientes, y orígenes diversos, como Canadá y Estados Unidos. Estas celdas operan con potencias que oscilan entre 0,5 kW y 15 kW, lo que indica un enfoque principalmente experimental o demostrativo, orientado a pruebas de validación de eficiencia o integración energética. Se reporta además el uso de una caldera con potencia térmica de 190 kW, un quemador de hidrógeno de 60 kW y un sistema de medios porosos desarrollado en Chile, lo que evidencia cierta capacidad de desarrollo nacional aplicado a procesos de combustión.

Tabla N°27 Características generales de los equipos utilizados como uso final por parte de las instituciones de I+D+i.

Institución	Equipo	Año de adquisición	País de origen	Dimensiones aproximadas [cm]	Potencia de salida (eléctrica o térmica) [kW]
Institución Q	Celdas de combustible	2024	USA	Desconoce	10
Institución C	Celdas de combustible	2019	Canadá	60x60x60	15
Institución I	Turbina	Desconoce	Desconoce	Desconoce	Desconoce
Institución H	Caldera	Desconoce	Desconoce	Desconoce	190
Institución L	Motor C-32	Desconoce	Desconoce	Desconoce	Desconoce
Institución D	Celdas de combustible	2023	USA	50X20X20	0,5
Institución E	Quemador de medios porosos	2024	Chile	30 x 5 x 5	3
Institución G	Quemador de hidrogeno	2023	España	200x50x10	60

La *Figura N°98*, presenta la distribución del costo total aproximado asociado a los equipos seleccionados por las instituciones para el uso final de hidrógeno verde. La categoría más representada corresponde al rango entre USD 10.001 y USD 30.000, con cuatro instituciones que reportan montos dentro de este intervalo, lo que sugiere que este es el umbral económico más común para la adquisición de equipamiento experimental o precomercial en esta área.

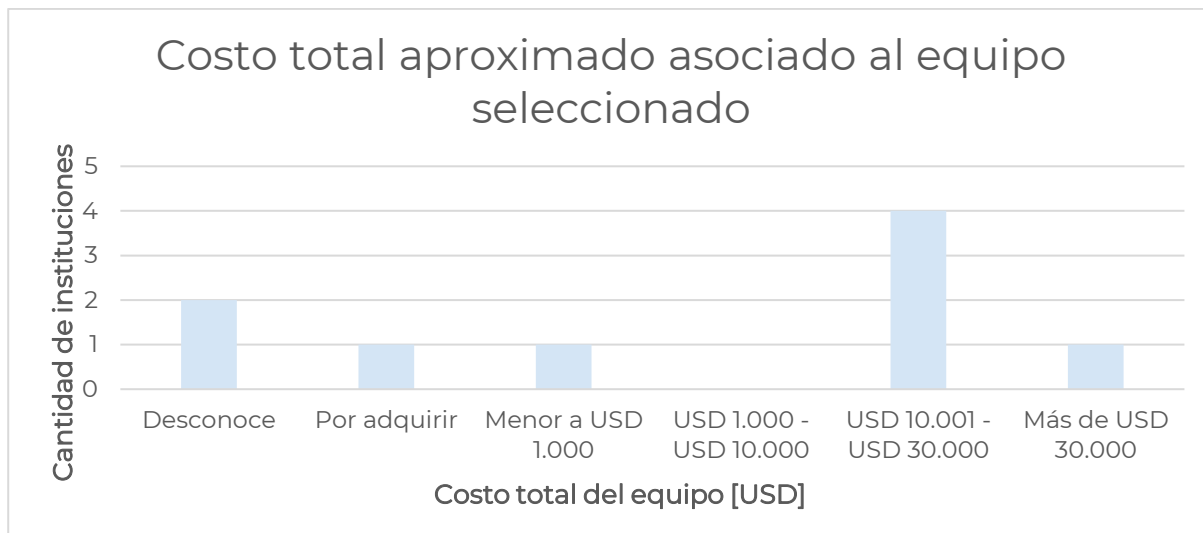
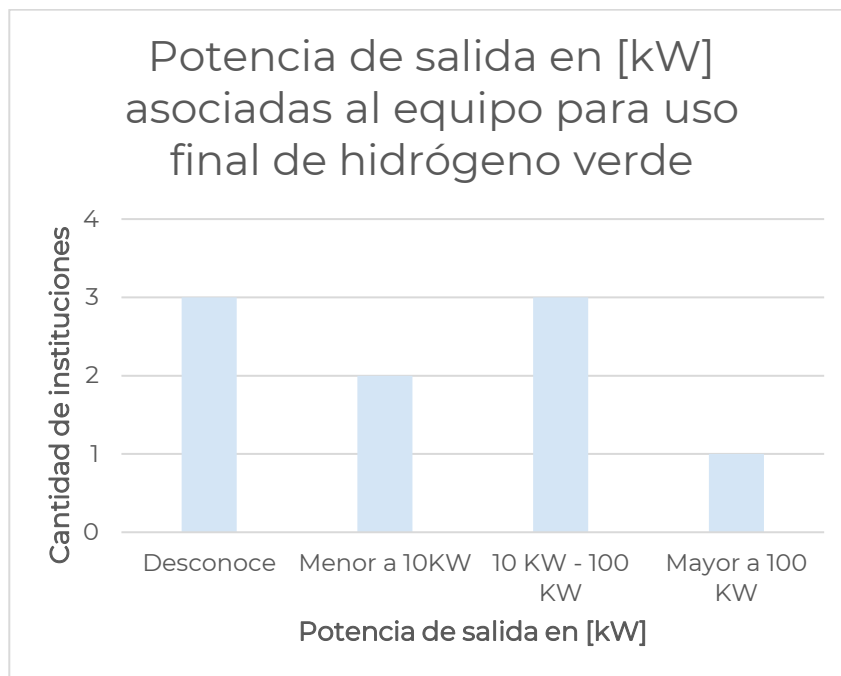


Figura N°98 Costo total aproximado del equipo utilizado para uso final de hidrógeno verde de derivado de hidrógeno verde. Respuestas 9/21.

Este panorama sugiere que, si bien existen variaciones, el grueso de las inversiones se sitúa en rangos accesibles para instituciones de investigación, lo que permite proyectar un potencial de expansión progresiva de capacidades tecnológicas, siempre que se cuente con líneas de financiamiento adecuadas y sostenidas.

La *Figura N°99*, muestra la distribución de la potencia de salida asociada a los equipos utilizados por las instituciones para el uso final del hidrógeno verde. La mayor concentración de respuestas se encuentra en el rango menor a 100 kW, con cinco instituciones distribuidas en 2 categorías distintas. Esto sugiere que la mayoría del equipamiento actualmente en operación corresponde a configuraciones de baja o media escala, orientadas principalmente a actividades experimentales, de validación tecnológica o pruebas piloto.



*Figura N°99 Cantidad de instituciones clasificadas según rangos de potencia de su equipamiento para uso final de hidrógeno verde. Respuestas 9/21.*

Además, tres instituciones declararon desconocer la potencia de salida de sus equipos, lo que refleja una debilidad en el registro técnico y puede dificultar la planificación y evaluación comparativa de capacidades. Solo una institución reporta un equipo con una potencia superior a 100 kW, lo que evidencia que aún son escasos los desarrollos que se acercan a condiciones semi-industriales o de operación continua.

El panorama general revela una infraestructura tecnológica aún en etapas tempranas, donde predominan los equipos de baja potencia destinados a ensayos o demostraciones. La escasa presencia de equipos de mayor escala y la falta de información técnica en varios casos limitan la posibilidad de escalar estas soluciones hacia aplicaciones industriales reales.

#### 4.4.2.7.1 Personal operador - Uso final de hidrógeno verde

En relación con el personal encargado de operar los equipos asociados al uso final de hidrógeno verde y sus derivados, cinco instituciones reportaron contar con operadores designados para esta función. Tres de ellas indicaron tener un único operador, mientras que las otras dos señalaron contar con un rango de entre dos y nueve personas en esta tarea. En tres de las instituciones, los operadores presentan un nivel de estudios universitarios. La edad promedio del personal se encuentra entre los 20 y 39 años, y en todos los casos reportados se trata de personas de sexo masculino. Esta configuración refleja una dotación operativa relativamente acotada, con perfiles técnicos jóvenes, lo que puede responder al carácter aún experimental de los proyectos y a la necesidad de personal con competencias específicas para la manipulación de equipos en entornos controlados.

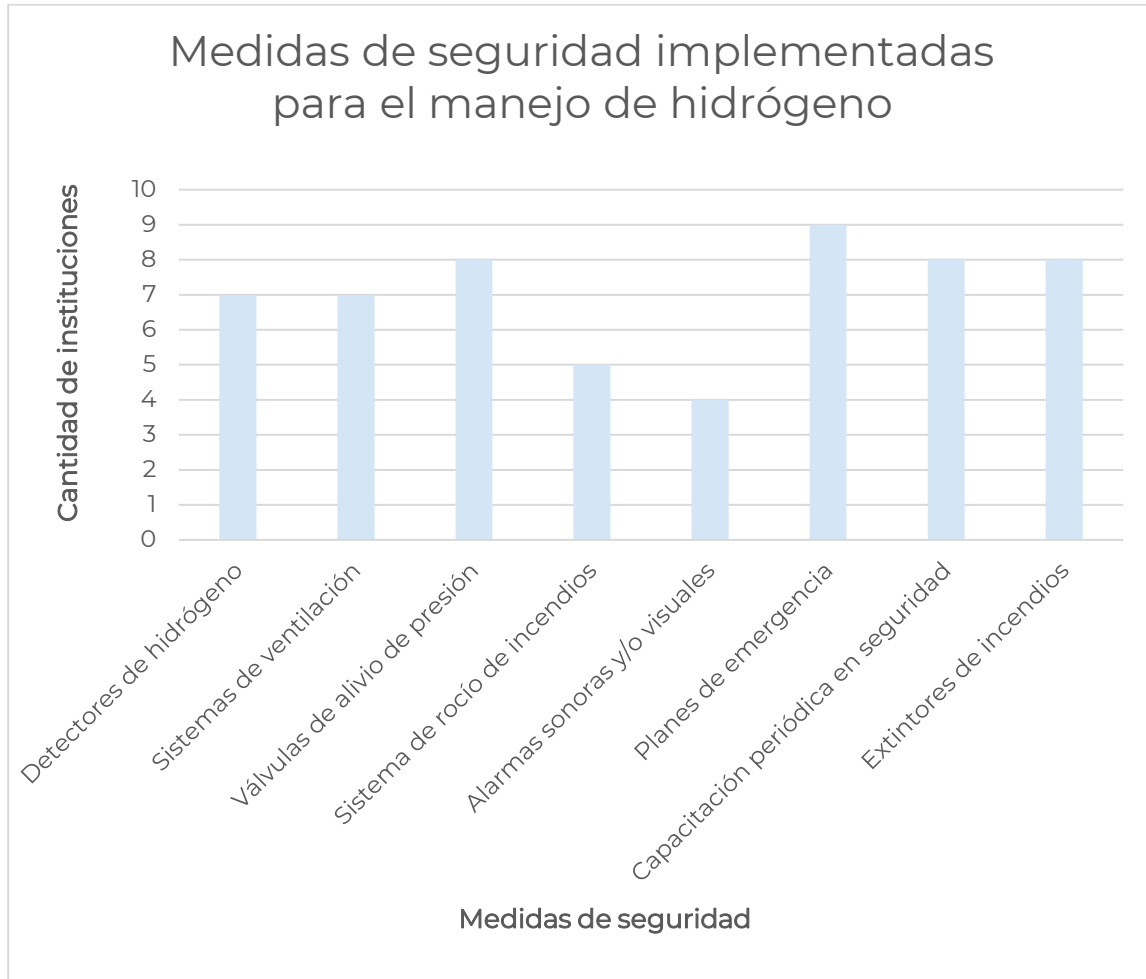
#### 4.4.2.7.2 Personal mantenedor - Uso final de hidrógeno verde

Respecto al personal encargado del mantenimiento de los equipos para el uso final de hidrógeno verde y sus derivados, cuatro instituciones reportaron contar con dotación asignada específicamente a esta función. En tres de ellas, se trata de una sola persona dedicada al mantenimiento, mientras que en la cuarta institución se indicó la presencia de un equipo compuesto por entre dos y nueve personas. En cuanto al nivel educativo, en tres de las instituciones el personal cuenta con formación universitaria, mientras que en una corresponde a nivel técnico superior. En todos los casos, el personal de mantenimiento se encuentra en un rango de edad promedio entre 20 y 39 años y corresponde al sexo masculino. Esta configuración da cuenta de una dotación técnica acotada pero calificada, lo que resulta adecuado para los requerimientos actuales de mantenimiento, aunque plantea desafíos futuros en términos de cobertura, especialización y continuidad operativa a medida que se escale el uso de este tipo de equipamiento.

#### 4.4.2.8 Equipamiento de seguridad en instalaciones de hidrógeno verde y derivados de los centros I+D+i

Esta sección presenta una caracterización del equipamiento de seguridad presente en las instituciones que desarrollan proyectos de investigación, desarrollo e innovación en torno al hidrógeno verde y sus derivados. Dadas las condiciones de inflamabilidad y riesgo tanto del hidrógeno como de sus derivados, la implementación de sistemas de seguridad adecuados es una condición habilitante para la operación de instalaciones experimentales o piloto. El análisis considera elementos como sensores de fuga, ventilación forzada, alarmas, señalética, extintores, y dispositivos de corte de emergencia, permitiendo evaluar el nivel de preparación técnica frente a riesgos asociados al manejo de hidrógeno en contextos controlados. Esta información es clave para identificar buenas prácticas, brechas de seguridad y requerimientos de estandarización que contribuyan al desarrollo seguro y sostenible del ecosistema nacional de I+D+i en esta materia.

Las instituciones encuestadas han implementado un conjunto integral de medidas de seguridad para el manejo de hidrógeno, reflejado en la *Figura N°100*. La mitad de los centros cuentan con detectores de hidrógeno y sistemas de ventilación adecuados para dispersar cualquier fuga antes de que alcance concentraciones críticas. Además, ocho instituciones disponen de válvulas de alivio de presión y cinco de sistemas de rociado contra incendios, mientras que cuatro han instalado alarmas sonoras y/o visuales que alertan ante escapes o sobrepresiones. Los planes de emergencia están presentes en nueve de los catorce centros, y ocho realizan capacitaciones periódicas en seguridad. Finalmente, ocho instalaciones mantienen extintores de incendios actualizados y adecuados para gas.



*Figura N°100 Medidas de seguridad implementadas por los centros I+D+i para el manejo del hidrógeno y sus derivados. Respuestas 14/21.*

Sin embargo, la frecuencia de entrenamiento del personal en estos protocolos varía considerablemente. Como se aprecia en la *Figura N°101*, cinco instituciones no llevan a cabo capacitaciones de manera periódica, lo cual deja a sus equipos operativos sin actualización continua en procedimientos críticos. Dos centros entrenan mensualmente, uno bimestralmente y otro trimestralmente; finalmente, cinco instituciones organizan sesiones anuales de seguridad. Esta disparidad en la periodicidad de la formación abre brechas en la preparación del personal, pues quienes reciben adiestramiento únicamente cada doce meses pueden pasar largos periodos sin reforzar sus conocimientos sobre protocolos de emergencia, rutas de evacuación o uso de equipos de protección.

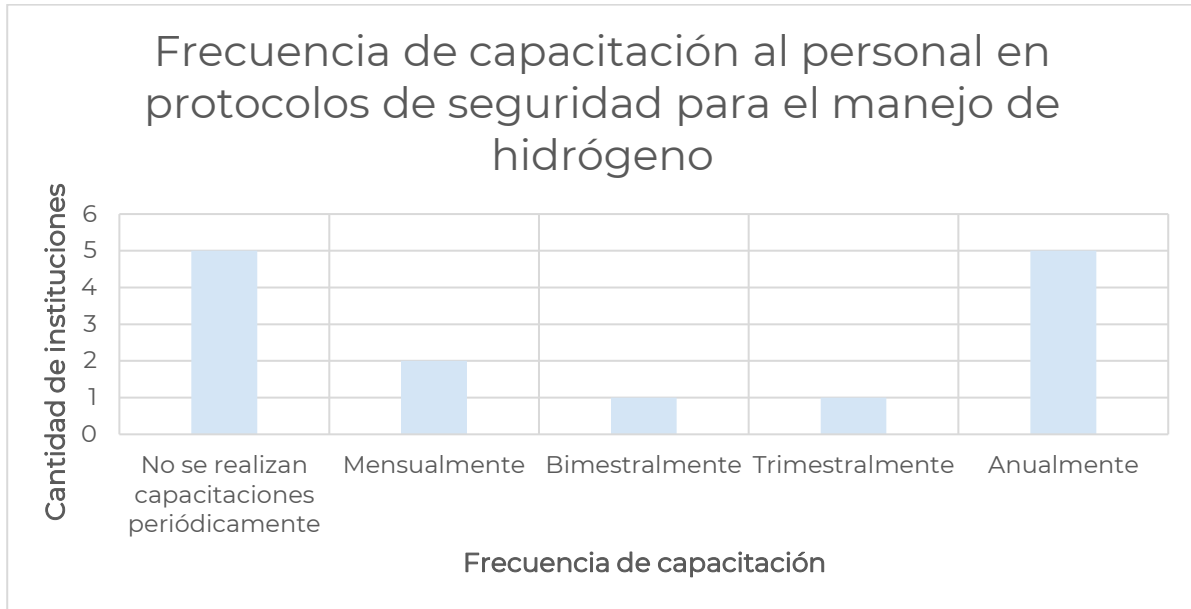


Figura N°101 Frecuencia de capacitación del personal en protocolos de seguridad dentro de centros I+D+i. Respuestas 14/21.

En cuanto a la documentación formal de procedimientos, la *Figura N°102*, muestra que cinco de las catorce instituciones carecen por completo de manuales o guías escritas para la operación segura de sistemas de hidrógeno. Otras cuatro sí cuentan con procedimientos documentados, pero estos requieren actualización urgente para incorporar los últimos estándares normativos y lecciones aprendidas en el terreno. Las cinco instituciones restantes disponen de protocolos debidamente actualizados, revisados y certificados por sus departamentos de seguridad industrial, lo que les permite aplicar prácticas uniformes en toda la organización.

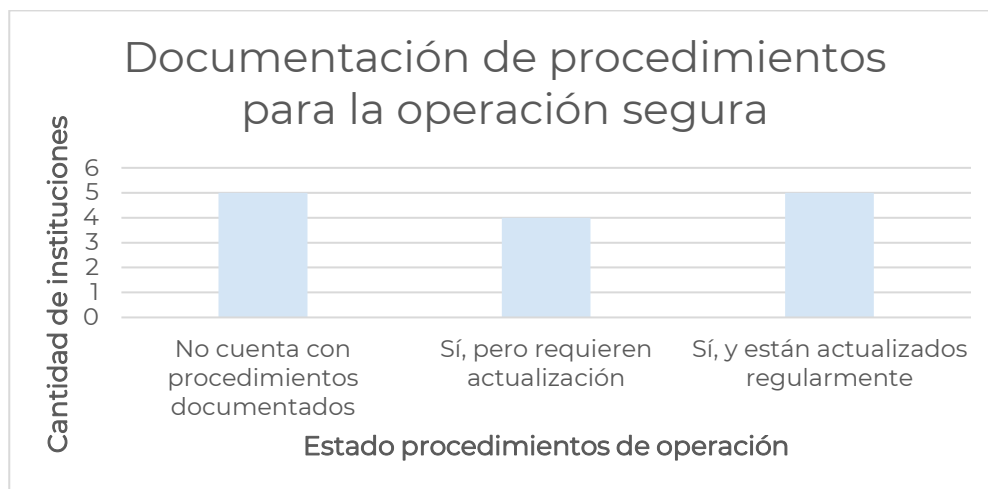
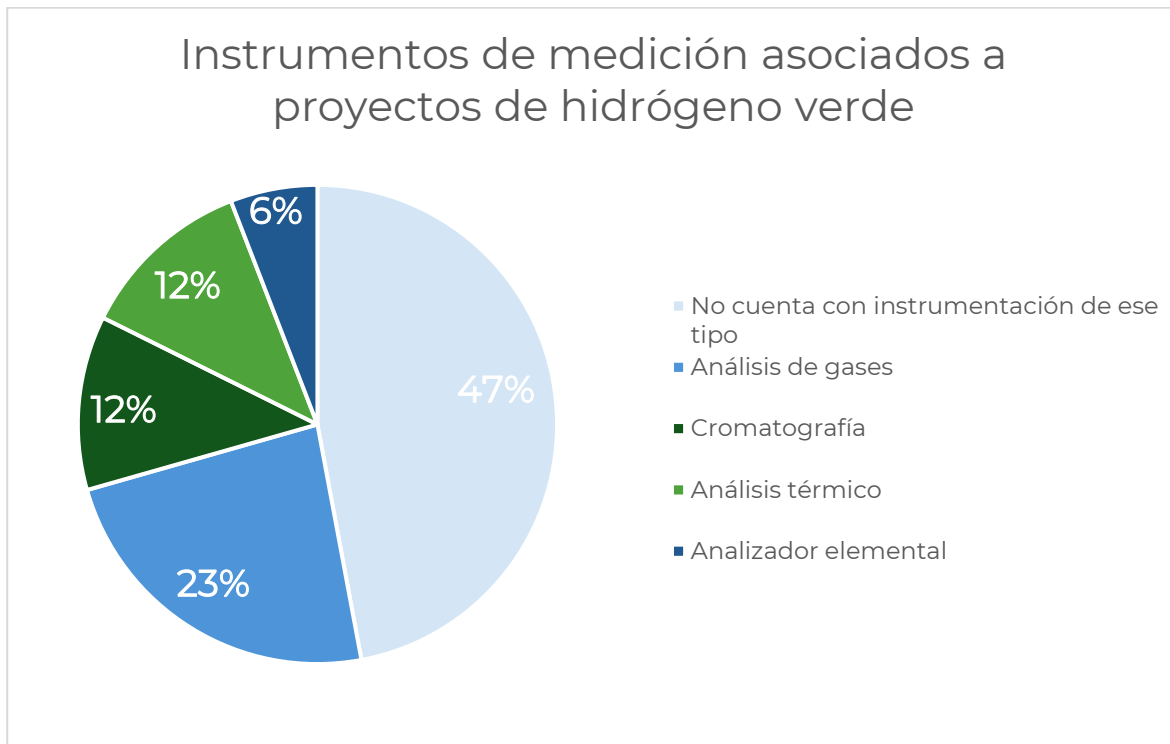


Figura N°102 Documentación de procedimientos para la operación segura. Respuestas 14/21.

En conjunto, estos resultados evidencian que, aunque las medidas físicas como detectores, ventilación, válvulas y extintores están firmemente establecidas, existen deficiencias significativas en la formación continua y la estandarización documental. Para mitigar riesgos operativos y garantizar una cultura de seguridad sólida, es indispensable que todas las instituciones establezcan un calendario de capacitaciones mínimas

#### 4.4.2.9 Equipamiento científico e instrumentación de los centros I+D+i

La validación y optimización de procesos en la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados dependen en gran medida de contar con instrumentación analítica adecuada. Esta sección recopila los datos sobre los principales equipos de medición, caracterización y control que las instituciones emplean en sus proyectos de I+D+i. A través de la *Figura N°103*, se evidencia la disponibilidad (o ausencia) de tecnologías analíticas críticas: análisis de gases, cromatografía, análisis térmico y analizadores elementales, cada uno de los cuales aporta una pieza fundamental para monitorear parámetros clave en electrólisis, síntesis catalítica, purificación y verificación de calidad del hidrógeno.



*Figura N°103 Distribución de las instituciones según el tipo de instrumentos de medición asociados a sus proyectos de hidrógeno verde. Respuestas 17/21 (se admiten 2 respuestas de equipos de medición por institución).*

En la práctica, casi la mitad de los centros carece de cualquiera de estos instrumentos especializados *Figura N°103*, lo que sitúa a estas instituciones en una condición muy vulnerable al no poder cuantificar con precisión la composición de gas, detectar impurezas, ni evaluar la estabilidad térmica

de materiales o catalizadores. Sin analizadores de gases (presente en 23% de los casos), resulta casi imposible confirmar la pureza del H<sub>2</sub>, por ejemplo, la presencia de oxígeno, nitrógeno o vapor de agua, antes de introducirlo en celdas de combustible o reactores de síntesis de metanol.

Un 12% de los centros cuenta con cromatógrafos que permiten cuantificar moléculas en mezclas complejas; esta técnica es esencial para caracterizar mezclas de gas sintético como, por ejemplo, metanol, CO, CO<sub>2</sub> y ajustar parámetros cinéticos en procesos catalíticos. Otro 12% dispone de equipos de análisis térmico, cuya función es evaluar la estabilidad y la actividad de membranas o materiales de electrodos cuando se somete a cargas térmicas. Finalmente, apenas un 6% dispone de analizadores elementales, vitales para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en muestras sólidas o polvos de catalizador, lo que es crucial para verificar la sinterización o la adsorción de contaminantes en fases sólidas.

La escasa penetración de estos instrumentos señala un cuello de botella para los proyectos I+D+i. Sin mediciones precisas, los proyectos tardan más en alcanzar niveles de madurez desde el laboratorio al piloto, pues no pueden validar rápidamente la eficiencia de nuevos materiales ni cuantificar las pérdidas en cada etapa. Por ejemplo, la falta de cromatografía retrasa la determinación de rendimientos de metanol o amoníaco, y la carencia de análisis térmico impide optimizar las temperaturas de operación en electrolizadores PEM.

#### 4.4.3 Infraestructura instituciones de formación de personal

Las instituciones de formación técnico-profesional encuestadas muestran una disponibilidad de espacios y equipamiento muy heterogénea para actividades vinculadas al hidrógeno verde. De las siete entidades que participaron en el estudio, solamente cuatro cuentan con infraestructura propia identificada como laboratorio o taller habilitado para ofrecer formación práctica o teórica en tecnologías relacionadas con hidrógeno verde. Sin embargo, ninguno de estos centros reporta la existencia de bancadas de alta presión, bancos de prueba de celdas de combustible o estaciones de compresión de gas, lo que impide llevar a cabo prácticas reales de producción, purificación o almacenamiento de hidrógeno.

Los espacios formativos, en su mayoría, consisten en aulas-taller con capacidades de entre 30 y 50 m<sup>2</sup>, dotadas de tomas eléctricas estándar y puntos de conexión a internet para monitoreo de parámetros. Sólo dos instituciones disponen de zonas de demostración de equipos fotovoltaicos o sistemas de generación de energías renovables de pequeña escala (paneles solares y aerogeneradores de baja potencia), lo cual facilita la enseñanza de la cadena de producción de hidrógeno verde desde la generación eléctrica. En contraste, las demás entidades dependen de presentaciones teóricas o plataformas de simulación virtual para cubrir la sección práctica del programa formativo, limitando sensiblemente la experiencia experimental de los estudiantes. Como resultado, aunque todas ofrecen contenidos teóricos sobre seguridad, normativas y fundamentos de tecnología de hidrógeno, la falta de espacios físicos equipados reduce la comprensión práctica: un alumno puede conocer los procesos de electrólisis en abstracto, pero carecer de la oportunidad de manipular electrolizadores reales o de comprobar in situ la necesidad de ventilación, detección de fugas y uso de extintores especial para gases ligeros.

En lo que respecta al estado de conservación y actualización de los talleres, los cuatro centros con infraestructura propia reportan un mantenimiento básico. Ninguno cuenta con un programa formal de mantenimiento preventivo para equipos de laboratorio, ni poseen partidas presupuestarias específicas para renovar componentes de seguridad (detectores de gas o sistemas de ventilación

mecánica). Esta situación repercute en la frecuencia de uso: los laboratorios de hidrógeno, cuando existen, operan a menos del 50% de su capacidad disponible, pues solo se habilitan para prácticas puntuales o proyectos de fin de curso, evitando inversiones en consumibles (electrolitos, compresores de gas) y riesgos asociados.

Por último, en materia de equipamiento específico, las instituciones de formación no informan la disponibilidad de tanques, compresores, secadores de hidrógeno o analizadores de pureza, por lo que toda la enseñanza se sustenta en maquetas a baja tensión y simulaciones por software. Si bien esto permite transmitir conceptos centrales, limita la formación de competencias extremadamente relevantes en la industria, como el manejo de cilindros a alta presión, la calibración de sensores de gas, o la implementación de protocolos de purga y pre-bombeo. En consecuencia, se identifica una brecha significativa: aunque existen contenidos académicos robustos, la prácticamente nula presencia de equipamiento para procesos reales de hidrógeno verde impide dotar a los estudiantes de habilidades operativas y de diagnóstico que el sector productivo demandará a corto plazo.

## 5 Gobernanza y modelos de sostenibilidad nacional

Este capítulo presenta hallazgos y análisis construidos principalmente a partir de entrevistas en profundidad realizadas a actores clave del ecosistema nacional del hidrógeno verde. Esta información cualitativa ha sido complementada con datos obtenidos mediante visitas en terreno y encuestas aplicadas a diversas instituciones.

El análisis se organiza en torno a tres criterios definidos para el estudio:

- 1) Alcances sobre la gobernanza e institucionalidad chilena.
- 2) Alcances a los modelos de sostenibilidad.
- 3) Desafíos de escalabilidad de proyectos vinculados al hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines.

### 5.1 Gobernanza e institucionalidad nacional

En Chile, la gobernanza nacional del hidrógeno verde se encuentra encabezada por el Ministerio de Energía, a través de la unidad de nuevos energéticos y otras autoridades como la Superintendencia de Electricidad y Combustibles SEC. Su principal tarea es dar seguimiento de la Estrategia Nacional de hidrógeno verde de 2020 a través de las siguientes acciones:

- Acelerar el despliegue de proyectos y aplicaciones.
- Favorecer el diálogo público-privado.
- Atraer inversiones y fomentar la formación de consorcio.

La ley 21.305, sobre eficiencia energética de 2021, define al hidrógeno y sus derivados como un combustible [31]. Por esta razón, su uso se encuentra regulado y limitado solo a aplicaciones industriales muy tecnológicas y de laboratorios, restringido solo a personal capacitado y a zonas industriales.

Para el escenario puntualizado, con respecto a los hallazgos del estudio en materia de gobernanza sobre el hidrógeno verde, sus derivados y afines, se comunican opiniones y posturas tomadas de informantes clave de centros I+D+i e instituciones para la formación de personal a través de entrevistas sostenidas con expertos, académicos, líderes de proyectos, responsables técnicos y coordinadores.

En cuanto al diálogo público-privado-académico algunas posturas destacan que:

- *“Actualmente, hemos visto mucho apoyo gubernamental para el desarrollo de inversiones en hidrógeno verde, sin embargo, no hemos visto empresas internacionales buscando aplicaciones o proyectos nacionales en hidrógeno verde”* (EDEPH2V-2025).
- *“Hay varias organizaciones de hidrógeno con objetivos parecidos. Por ejemplo, H2 Chile, que partió agrupando a todos, desde empresas gigantes hasta proyectos chiquititos. Siento que falta que esas redes se subdividan en temas más específicos. Así, si buscas algo de normativa o financiamiento, sabes exactamente a qué grupo dirigirte. Entiendo que, al principio, con pocos miembros era lógico agrupar a todos, pero ahora, con 70 o más, es inmanejable y no se alinean en nada. Hay que categorizarlos por cadena de valor (producción, distribución, etc.)”*

*Para poder gestionar la comunicación y enviar información relevante solo a quien le interesa. Eso ayuda a coordinar” (EGIH2V-2025).*

Respecto al despliegue de proyectos y aplicaciones:

- *“La coordinación debe hacerla un centro de investigación o pilotaje, debido a la experiencia e identificación de los desafíos técnicos y económicos” (EDEPH2V-2025).*
- *“El financiamiento de centros de formación para personal calificado en hidrógeno es lo que consideramos más relevante, la cual debería ser una alianza público-privada. Es decir, que los centros de formación puedan entregar ofertas y preparación al campo industrial tan pronto como sea posible” (EGIH2V-2025).*
- *“Una perspectiva de mejora, tener financiamiento para poder ir revisando los distintos estándares de inspección y calidad de las industrias, con el fin de darle continuidad y seguimiento a dichos estándares” (EGIH2V-2025).*

Finalmente, con respecto a la atracción de inversiones y fomento de consorcios:

- *“Motivar a empresas de energía y consorcios para ver posibilidad de participación directa en la industria de hidrógeno verde” (EPH2VDE- 2025).*
- *“Como es una industria nueva y muy intensiva en capital, lo lógico sería trabajar en alianzas para compartir el riesgo, pero las conversaciones son difíciles porque las empresas temen que otros invadan sus áreas tradicionales, como la producción o la distribución para el caso de la industria nacional” (EDEPH2V- 2025).*
- *“Necesario el vínculo entre empresas nacionales e internacionales, por lo que invitaciones y apoyo de empresas nacionales asistan a ferias del hidrógeno de distinta índole es necesaria que sea abordadas por organismos gubernamentales. Es necesaria dicha interacción” (EGIH2V-2025).*

Para el escenario considerado, y para efectos de potenciar la institucionalidad y la gobernanza en torno al hidrógeno verde, una de las recomendaciones es trabajar sobre una coordinación permanente entre grupos de interés y otros actores, con el fin de asegurar la sostenibilidad del desarrollo de esta industria, en materias como regulación, impacto ambiental, financiamientos, redes de colaboración (público- privadas- academia), entre otros.

Con respecto a la normativa, es importante contar con esquemas de certificación que permitan rastrear y certificar de dónde y cómo se produce el hidrógeno. La Agencia Internacional de la Energía [8] recomienda establecer políticas de gobernanza para la certificación, normalización y regulación para el hidrógeno verde y derivados.

## 5.2 Modelos de sostenibilidad

La habilitación del mercado debe enfocarse no solo en la infraestructura, los equipamientos y las regulaciones, sino también en la sostenibilidad y la certificación del hidrógeno verde. En este sentido, para posicionar a Chile como un proveedor confiable en el mercado internacional, los retos a los que

se enfrenta el desarrollo de la industria del hidrógeno verde no recaen solamente en la fase de producción, sino en múltiples etapas de la cadena de valor.

Por todo ello, se torna fundamental el desarrollo de estrategias que garanticen la sostenibilidad de toda la cadena de valor desde diferentes perspectivas: implementando políticas públicas; diseñando estándares y certificaciones; estableciendo alianzas tecnológicas para la transmisión de conocimiento; promoviendo financiamiento para potenciar los segmentos menos eficientes económicamente y promover la formación de capital humano suficientemente versátil para adaptarse a los retos y desafíos de la industria del hidrógeno verde en tanto fuente energética estratégica para descarbonizar la economía nacional.

Al respecto se presentan posturas de actores clave entrevistados con los alcances y aprensiones sobre los modelos de sostenibilidad económica, social, ambiental, de formación de personal y de investigación y desarrollo, con el propósito de considerar recomendaciones y discusiones orientadas a desarrollar la madurez de la industria del hidrógeno verde y sus derivados.

Los alcances sobre los modelos de sostenibilidad para la industria del hidrógeno verde se organizan en torno a cinco criterios agrupados sobre necesidades y problemáticas en materia de 1) personal calificado; 2) aspectos técnicos (I+D+i); 3) aspectos económicos; 4) aspectos sociales y; 5) en materias ambientales.

Posturas en torno al personal calificado:

- *“Actualizar mallas de universidades, no considerando carreras específicas, pero insertando cursos específicos que abarquen las temáticas del hidrógeno verde y sus derivados”* (EPSC-01-2025).
- *“El personal calificado debe seguir siendo entrenado para la instalación y mantención de los equipos. Capaz de poder modificar y remodelar una instalación de hidrógeno para fines comerciales que lo ameriten”* (EPH2VDE-02-2025).
- *“Resulta necesario un plan para la capacitación en distintas áreas del conocimiento a profesionales del ámbito de la ingeniería, científico y humanistas para poder dotar de herramientas al negocio del hidrógeno”* (EPSC-02-2025).
- *“La escasez de personal técnico calificado es la principal necesidad”* (EPSC-03-2025).
- *“No hay personal calificado. Pueden tener experiencia en proyectos, pero falta más certificación, diplomas, certificaciones, licencias”* (EPSC-05-2025).
- *“Déficit de personal calificado e infraestructura para formación. Falta de personal calificado e insuficiente formación técnica como problemas fundamentales, junto con la necesidad de un ecosistema que permita la experimentación con nuevas tecnologías”* (EPSC-05-2025).
- *“Falta de personal en laboratorio, transporte por tuberías, cuesta encontrar gente capacitada”* (EPSC-05-2025).
- *“Carencia de personal para hacer mantenciones”* (EPSC-08-2025).
- *“Uno de los desafíos es la falta de personal con experiencia práctica en proyectos. Encontrar gente joven que llegaba como 'especialista' en hidrógeno. Pero si no hay proyectos reales en Chile, ¿cómo pueden tener esa experiencia? Yo creo que falta mucho ese lado práctico, saber que la persona ha estado en un proyecto, que vio cosas reales, no solo teoría”* (EPSC-07-2025).
- *“Aunque hay incentivos para incluir mujeres, en la práctica, si no hay candidatas con la experiencia necesaria, se vuelve muy difícil. Es un desafío, porque, aunque la intención y los puntos en las evaluaciones están ahí, en la realidad, hay menos mujeres en ingeniería y muchas menos en estas áreas tan específicas”* (EPSC-07-2025).
- *“Cuota de género, falta participación de mujeres”* (EPSC-05-2025).

En cuanto a las posturas sobre aspectos técnicos relacionados con la investigación y desarrollo (I+D), puntualizar las siguientes:

- *“Actualmente, los proyectos de financiamiento de instalación de plantas de hidrógeno quedan sin un respaldo en el tiempo”* (EPSC-02-2025).
- *“La operación del centro es abordable para potenciar procesos de investigación y desarrollo”* (EPSC-02-2025).
- *“La mantención y optimización del uso del hidrógeno es un tema que aún no se ha abordado”* (EPSC-02-2025).
- *“Elevados costos energéticos, de materiales y de equipos”* (EPSC-01-2025).
- *“Los procesos de regularización son lentos y complejos tanto con SERNAGEOMIN como también con la SEC. Especialmente, para esta industria que es tan nueva”* (EPSC-03-2025).
- *“Hemos visto varios desafíos. Primero, la incertidumbre en algunas normativas y la falta de información para comparar costos o hacer benchmarks. Como hacemos bastantes estudios y experimentos, es difícil saber, por ejemplo, por qué un vehículo de hidrógeno rindió de cierta manera; no hay antecedentes claros o nuestros experimentos no son totalmente controlados, así que las explicaciones son más hipótesis”* (EPSC-07-2025).
- *“Faltan datos y bases para hacer análisis más precisos y decir 'esto pasó por esto'. Y ligado a eso, en temas de normativa, estamos haciendo pruebas piloto con vehículos de hidrógeno, pero ¿quién dice que están bien hechas? Por más que nosotros internamente las justifiquemos, estas cosas deberían venir de un consenso de la industria. Creo que falta ese consenso general, esas buenas prácticas establecidas, una referencia clara, quizás de algún organismo internacional, que te diga 'esto se hace así' o 'la mejor forma es esta por estas razones'. Estamos haciendo lo que nos parece lógico, pero no hay una base formal o un 'siempre se ha hecho así' en qué apoyarse”* (EPSC-07-2025).
- *“Falta de infraestructura habilitante para realizar estudios de tecnologías”* (EPSC-11-2025).
- *“Falta I+D+i por la dedicación de personal para este ámbito”* (EPSC-11-2025).

En cuanto a las posturas sobre aspectos económicos, los entrevistados puntualizaron las siguientes:

- *“Es necesario avanzar en instalaciones que tengan la flexibilidad de poder cambiar, ampliar o trasladarse en función de nuevos negocios”* (EPSC-02-2025).
- *“Realizar una planificación a largo plazo, es problemático. Debido a que no entregan financiamiento para mejoras incrementales”* (EPSC-03-2025).
- *“El principal problema que vemos es la incertidumbre de los precios. Es un mercado muy nuevo, muy volátil. Los precios suben y bajan por cosas raras, como crisis comerciales o lo que pasó con el COVID. Entonces, conseguir precios estables es difícil. Y también, conseguir proveedores. Los grandes son muy caros, y como somos una empresa pequeña y buscamos cosas más baratas, tenemos que arriesgarnos con proveedores menos conocidos. La volatilidad de los precios es súper importante. Y cuando pides cotizaciones, no siempre queda claro qué te están incluyendo. Aparte, están todos los costos escondidos, los que no ves al principio, como los de aduana, si la carga es especial, o los impuestos. Todo eso hace que los costos finales sean un poco misteriosos”* (EPSC-07-2025).
- *“Hay bastante incertidumbre para invertir tiempo y recursos en el hidrogeno y su economía”* (EPSC-08-2025).

- “Se requiere mayor infraestructura, lo que implica mayores costos e inversión” (EPSC-11-2025).
- “Alto costo de la producción del hidrógeno verde y de los equipos” (EPSC-9-2025).

De las posturas sobre aspectos sociales, las siguientes:

- “Los proyectos deben estar integrados con la ciudadanía con tal de hacerlos partícipes, fortaleciendo la mano de obra local y otorgando beneficios” (EPSC-01-2025).
- “Creemos necesario seguir informando a la comunidad universitaria y emprendedora para que conozcan este tipo de instalaciones con el fin de ampliar las posibilidades de nuevos negocios” (EPSC-02-2025).
- “En lugares como Punta Arenas, con los proyectos enormes, hay rechazo por la incertidumbre del impacto en la calidad de vida de la gente por el crecimiento, que se convierta en algo como el norte con mucha población flotante. Eso lo ven como no tan bueno” (EPSC-07-2025).

Finalmente, con respecto a los aspectos medioambientales, las posturas aluden a las siguientes necesidades y problemáticas:

- “Proyectos que no consideran la completitud de riesgos medioambientales que pueden generar” (EPSC-01-2025).
- “En Tiltil (Región Metropolitana) adaptar los trabajos a las condiciones ambientales extremas es el principal desafío. En verano se llegan hasta los 42°C y en invierno a 5°C” (EPSC-03-2025).
- “Lo que he visto es mucho desconocimiento general sobre el hidrógeno, lo que lleva a rumores. A las empresas les cuesta compartir información, la ven como muy confidencial, como una ventaja competitiva. Pero creo que eso genera especulación, justo lo contrario a lo que uno querría. Por ejemplo, tuvimos un caso con un camión que se mueve transportado por otro, pero como manteníamos todo confidencial, la gente vio que aparecía en diferentes ciudades y nos acusaron de que lo estábamos cargando ilegalmente. También he visto especulación en otros proyectos grandes por esa falta de claridad” (EPSC-07-2025).
- “Las mayores dificultades es la integración de los procesos previos, es decir, la integración de la energía renovable, porque integración de paneles fotovoltaicos, integración de generadores eólicos tiene un impacto ambiental, generar energía va a generar un impacto ambiental, Y creo que ahí es donde están las mayores dificultades. Ejemplo, con el tema de la desalinización de agua, de mar, qué van a hacer con ese sodio, dónde se van a instalar esas empresas, esos procesos” (EPSC-03-2025).
- “No hemos tenido problemas en el ámbito ambiental, ni vemos una dificultad en la planta de hidrogeno para afectar el medio ambiente” (EPSC-02-2025).
- “La responsabilidad ambiental por parte de las empresas se debe reforzar” (EPSC-01-2025).

### 5.3 Desafíos de escalabilidad de proyectos

La escalabilidad de proyectos o iniciativas puede definirse como la capacidad de mantener un rendimiento constante o superior dentro de un modelo de negocio, independientemente de variaciones en los recursos o componentes involucrados. Esta característica resulta crítica en industrias emergentes como la del hidrógeno verde, donde la expansión progresiva de capacidades operativas y técnicas determina en gran medida su viabilidad en el mediano y largo plazo.

El crecimiento organizacional asociado a este tipo de iniciativas considera diversas etapas que van desde la construcción y validación del modelo de negocio, la captación de clientes y la gestión de ingresos y costos, hasta la consolidación de procesos internos, el acceso a recursos financieros, el establecimiento de alianzas estratégicas y la madurez institucional necesaria para operar a gran escala.

En el marco de esta investigación, se presentan a continuación los principales planteamientos recogidos en entrevistas a actores clave a nivel nacional, quienes identificaron desafíos, fortalezas, necesidades y oportunidades para la escalabilidad de proyectos relacionados con hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines. Los aportes reflejan la experiencia de instituciones dedicadas tanto a la investigación y desarrollo como a la formación de personal técnico, considerando los distintos niveles de avance en la implementación de sus iniciativas.

El análisis se estructura en base a cuatro criterios, definidos a partir de las problemáticas y requerimientos más recurrentes en los testimonios recabados:

- Requerimientos de inversión y coordinación entre múltiples actores involucrados.
- Adquisición de infraestructura y equipamiento para producción de hidrógeno verde a gran escala.
- Condiciones operativas y funcionamiento del equipamiento en el contexto de expansión.
- Incompatibilidades entre la infraestructura existente y los nuevos equipamientos adquiridos.

Estos criterios permiten organizar de forma sistemática los elementos críticos que inciden en la viabilidad técnica y estratégica de los procesos de escalamiento, los cuales serán analizados en las secciones siguientes.

Al respecto, en cuanto a las posturas consideradas para las necesidades y problemáticas sobre inversiones y coordinación de múltiples actores involucrados, se destacan las siguientes:

- *“Falta una demanda clara de hidrógeno verde, sin esta demanda el interés tanto del sector público, como del sector privado no será elevada” (EDEPH2V-1-2025).*
- *“Una de las problemáticas es disponibilidad de insumos y personal calificado en las alianzas públicos-privadas realizadas” (EDEPH2V-3-2025).*
- *“Se ve mucho secretismo y poca colaboración real, aunque en los seminarios se hable mucho de ella. A la hora de invertir, cada actor quiere acaparar roles y meterse en toda la cadena de valor, más allá de su expertise. Esa actitud de querer abarcar todo hace las negociaciones difíciles y lentas, porque intentan ganar dinero de algo que aún no lo da” (EDEPH2V-7-2025).*
- *“El gobierno ha tenido una línea clara y se ve una estrategia de estado. Por lo que, vemos que hay disponibilidad de subsidios y fondos. Ha habido muchos aportes y fondos creados exclusivamente para tratar de impulsar esto, como los programas tecnológicos, el mismo tema ahora de los subsidios para la implementación de empresas para la producción de electrolizadores, son jugadas bien arriesgadas y desde el sector público se están haciendo” (EDEPH2V-8-2025).*

- *“Se necesita más asociaciones que competitividad, es decir, necesitamos la creación de alianzas, consolidar lo que ya está, en este sentido se necesita más trabajo en equipo” (EDEPH2V-11-2025).*

Con respecto a las necesidades y problemáticas sobre la adquisición de infraestructura y equipamiento para la producción hidrógeno verde a gran escala, considerar las siguientes:

- *“Hacen falta proveedores locales, que permitan reducir los costos de adquisición y fortalecer la industria local” (EDEPH2V-2025).*
- *“La adquisición y disponibilidad de equipamiento de hidrógeno verde, es lenta y costosa” (EDEPH2V-2025).*
- *“Un desafío es que los equipos sean competitivos en tiempo de entrega y precio. Pero súper importante es el servicio postventa: el mantenimiento, la capacitación. Cuando te instalan algo, te lo dejan impecable, pero después se van, y el 99% del tiempo estás tú solo operando. Ese es el problema principal en los proyectos que compran lo más barato, pero después operarlo es complejo” (EDEPH2V-2025).*
- *“El tema normativo: saber si lo que compras cumple las normas de Chile ahora o en el futuro, eso es difícil porque no hay muchos antecedentes” (EDEPH2V-2025).*
- *“Grandes cantidades de problemáticas, ejemplo: puertos, equipamiento en general, logística, lugar físico de los proyectos” (EDEPH2V-9-2025).*

Con respecto al funcionamiento del equipamiento, considerar las siguientes necesidades y problemáticas:

- *“La principal dificultad para este proyecto fueron las distancias de seguridad de la planta productora con respecto a las plantas satélites de regasificación (PSR)” (EDEPH2V-2025).*
- *“Los grandes problemas al poner en marcha el equipamiento es asegurar su correcta operación y mantenimiento a largo plazo, confirmando su adecuación a la normativa local incierta y superar las incompatibilidades generadas por la falta de estandarización en la infraestructura existente con respecto a la nueva” (EDEPH2V-2025).*
- *La mantención a través de mano de obra calificada” (EDEPH2V-11-2025)*

Con relación a las incompatibilidades de la infraestructura existente ante los equipamientos adquiridos, puntualizar las siguientes posturas de los actores clave entrevistados:

- *“La planta fue diseñada a la medida en términos de la infraestructura asociada al blending con hidrógeno, por lo que no se consideró infraestructura existente más allá del uso de suelo” (EDEPH2V-1-2025).*
- *“La instalación de los equipos y la adaptación de las líneas de hidrogeno a los ambientes mineros es una problemática. Se necesita capital humano capacitado para realizar las adaptaciones del equipamiento a la infraestructura existente” (EDEPH2V-2025).*
- *“Hemos tenido problemas de incompatibilidad, sobre todo en los sistemas de carga o dispensación. Por ejemplo, el dispensador para grúas es distinto al de camiones, entonces necesitas líneas separadas. Incluso hemos querido usar infraestructura de carga de otros proyectos existentes, pero nos pasa lo mismo, no son compatibles” (EDEPH2V-7-2025).*

- *“La puerta de combustible para aplicaciones móviles tiene la dificultad que están asociadas a un dispensador para la recarga con un tipo de conector asociado y bajo un tipo de presión. Si yo trabajo con grúa horquilla y luego tú llegas con un auto, no puedo usar el mismo dispensador, porque no son las mismas presiones. Lo mismo para un camión de manual, no lo puedo recargar porque el dispensador es distinto, el tipo de conector es distinto” (EDEPH2V-8-2025).*
- *“La gran integración es la electromovilidad igual es bastante específico. Los dispensadores de hidrogeno son todos distintos para camiones, grúas, autos. Por lo que dificulta mucho la compatibilidad del uso de las hidro lineras. Los puntos de carga de hidrogeno es demasiado variado. No así los electrolizadores” (EDEPH2V-8-2025).*

## 6 Resultados del estudio en contexto internacional

Este capítulo presenta una revisión de equipamiento científico y tecnológico disponible en centros internacionales vinculados al hidrógeno verde. Se analizan casos destacados que permiten comprender el tipo de infraestructura, capacidades técnicas y líneas de investigación que sustentan el avance del hidrógeno verde en distintos países. El objetivo es identificar experiencias y referentes que puedan orientar la consolidación de capacidades tecnológicas en el contexto nacional.

A continuación, en la *Tabla N°28*, se listan los centros internacionales que participaron en este estudio, indicando su nombre o razón social, el director o informante clave y su ubicación geográfica.

*Tabla N°28 Catastro de instituciones internacionales que participaron de uno o más de los instrumentos utilizados en este estudio. Instituciones 20.*

N°	Nombre o Razón Social	Ubicación
1	Institución INT-1	USA
2	Institución INT-2	USA
3	Institución INT-3	USA
4	Institución INT-4	USA
5	Institución INT-5	USA
6	Institución INT-6	Escocia
7	Institución INT-7	España
8	Institución INT-8	España
9	Institución INT-9	China
10	Institución INT-10	USA
11	Institución INT-11	Colombia
12	Institución INT-12	Colombia
13	Institución INT-13	España
14	Institución INT-14	Reino Unido
15	Institución INT-15	Australia
16	Institución INT-16	Australia
17	Institución INT-17	Alemania
18	Institución INT-18	Australia
19	Institución INT-19	Suiza
20	Institución INT-20	Reino Unido

La información sobre estas instituciones fue recopilada utilizando diversas técnicas e instrumentos metodológicos, como entrevistas, encuestas, visitas a terreno e investigación de información pública. La

*Tabla N°29*, titulada Participación de instituciones internacionales en instrumentos empleados para este estudio, complementa el catastro de la *Tabla N°28*, al detallar específicamente en qué instrumento de recolección de información participó cada una de las instituciones listadas previamente. Esto permite comprender la metodología aplicada para obtener los datos sobre cada entidad internacional incluida en el análisis

Tabla N°29 Participación de instituciones internacionales en instrumentos empleados para este estudio.

N°	Nombre o Razón Social	Visita	Encuesta	Entrevista	Información pública
1	Institución INT-1	●		●	
2	Institución INT-2	●		●	
3	Institución INT-3	●		●	
4	Institución INT-4	●			●
5	Institución INT-5	●			
6	Institución INT-6		●		●
7	Institución INT-7		●	●	
8	Institución INT-8		●		
9	Institución INT-9		●		
10	Institución INT-10		●		
11	Institución INT-11		●		
12	Institución INT-12		●		
13	Institución INT-13		●		
14	Institución INT-14				●
15	Institución INT-15			●	
16	Institución INT-16				●
17	Institución INT-17				●
18	Institución INT-18				●
19	Institución INT-19				●
20	Institución INT-20				●

La Figura N°104, muestra que, de las 14 instituciones encuestadas, la mayoría corresponde a empresas, seguidas por universidades o Instituciones de Educación Superior (IES) con 4 respuestas. Las instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL) y las entidades de la administración pública aportan con 2 encuestas cada una. Este sesgo hacia los actores empresariales e instituciones de educación superior sugiere que el sector privado y la academia lideran la investigación y desarrollo en hidrógeno verde en Chile, mientras que la participación de organismos públicos y fundaciones es más reducida. Como consecuencia, cualquier estrategia de fortalecimiento de infraestructura o capacitación debería considerar esta distribución para fomentar colaboraciones que integren más activamente a las entidades públicas y a las organizaciones sin fines de lucro.

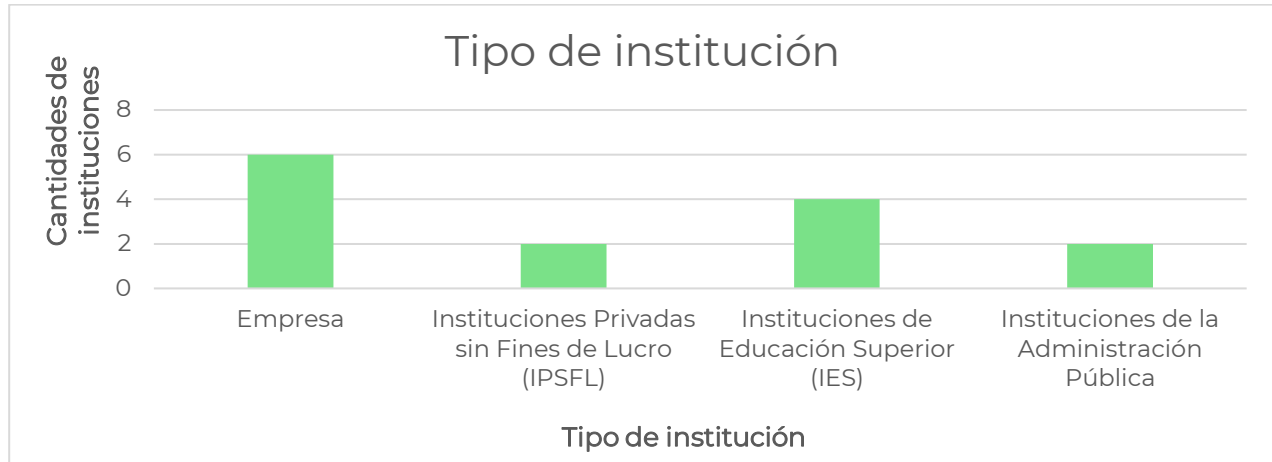


Figura N°104 Gráfico con la cantidad y tipos de institución siendo “Empresa”, “Instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL)”, “Instituciones de educación superior (IES)” e instituciones de administración pública. Respuestas 14/20.

La Figura N°105, revela que las 14 instituciones internacionales encuestadas provienen de un conjunto diverso de países, con mayor representación de España y Australia. Otros países con participación incluyen Colombia (2), Reino Unido (2), y uno por cada uno en China, Estados Unidos, Alemania, Suiza y Escocia. Esta distribución sugiere que, si bien Europa y Oceanía concentran el mayor número de centros aliados en hidrógeno verde, también existe un alcance global que incluye América, Asia y el Medio europeo. La variedad geográfica de los participantes indica la existencia de redes de colaboración amplias que pueden potenciar el intercambio de buenas prácticas y tecnologías. Sin embargo, la menor cantidad de instituciones en regiones clave como Norteamérica y Asia (a excepción de China y Estados Unidos) plantea la oportunidad de fortalecer vínculos con centros de I+D+i en esas áreas, donde se desarrollan avances significativos. En consecuencia, fomentar más alianzas en estos territorios podría enriquecer el aprendizaje mutuo y acelerar la transferencia de conocimientos y soluciones adaptadas a distintos contextos nacionales.

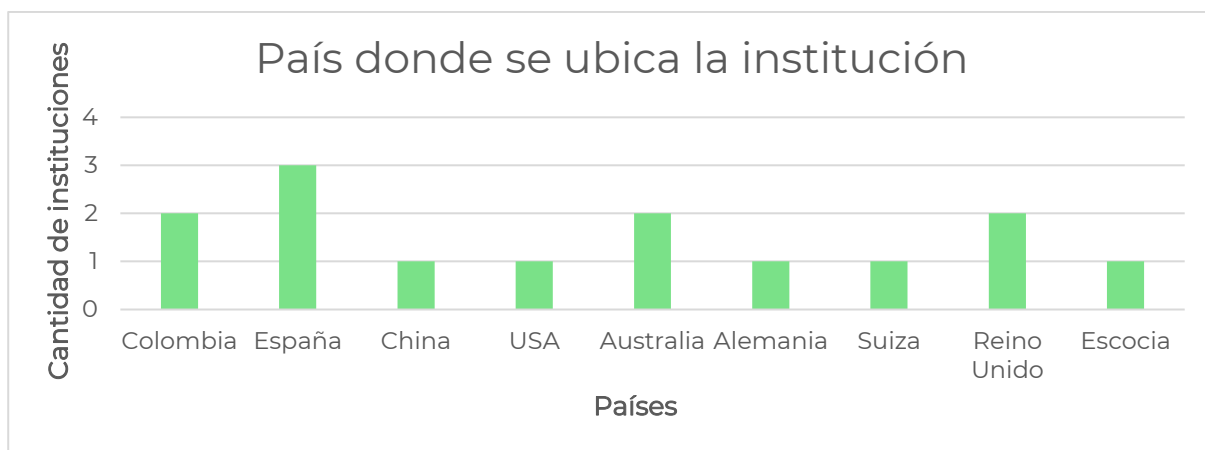
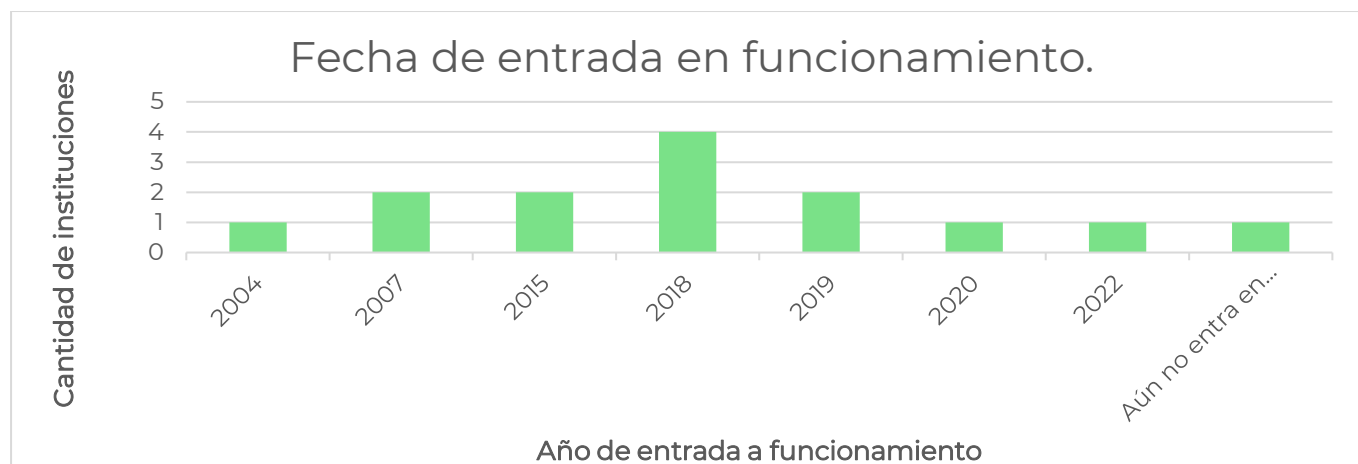


Figura N°105 Gráfico que muestra los distintos países en donde se ubican las instituciones internacionales participantes. Respuestas: 14/20.

La *Figura N°106*, muestra que en 2004 se inauguró una institución internacional, en 2007 dos, y en 2015 otras dos entraron en funcionamiento. El pico se observa en 2018, año en el que cuatro centros comenzaron a operar, seguido de dos más en 2019. Aún hay una entidad prevista que todavía no ha empezado a funcionar y otras se sumaron más recientemente en 2020 y 2022. Esta tendencia evidencia un fuerte impulso en torno a 2018, cuando numerosos actores internacionales consolidaron sus capacidades para hidrógeno verde, y luego un ritmo más moderado conforme los proyectos avanzan hacia su fase operativa plena.



*Figura N°106 Año de entrada en funcionamiento de las instituciones internacionales encuestadas. Respuestas 14/20.*

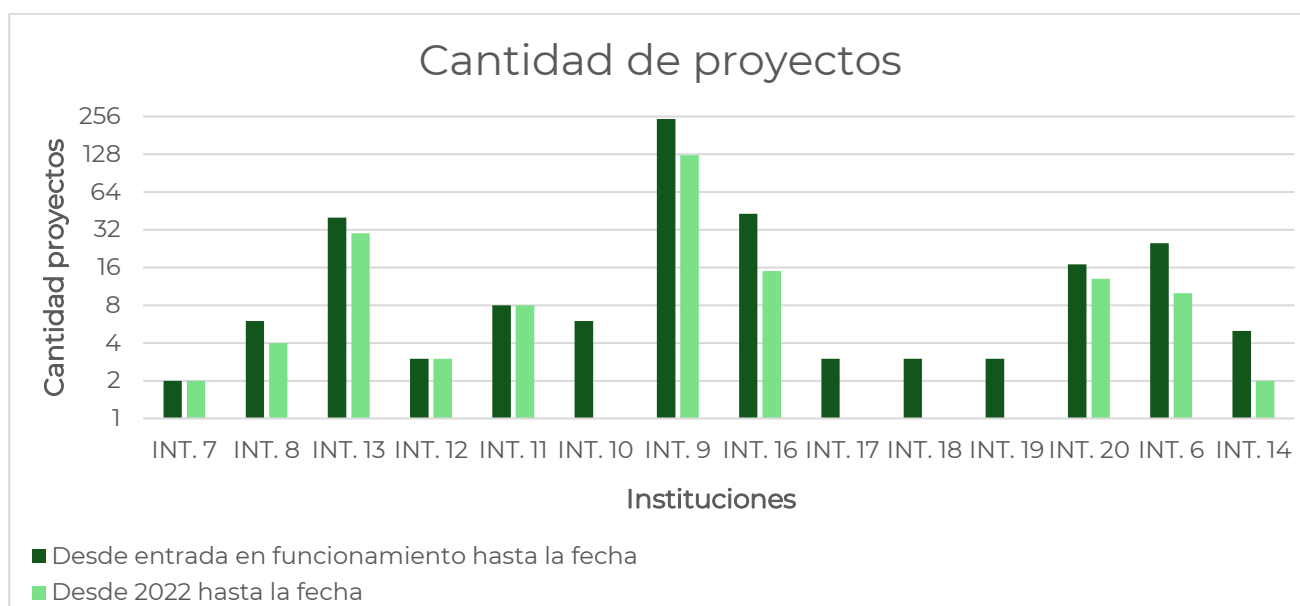
Este panorama temporal revela que, aunque existen instituciones con trayectoria de más de una década, buena parte de los centros se han constituido en los últimos cinco años, alineándose con el interés global por las energías limpias y los objetivos climáticos. La concentración de aperturas en 2018 señala un punto de inflexión, posiblemente motivado por políticas de estímulo e inversión en hidrógeno renovable a nivel internacional. Al mismo tiempo, la aparición de nuevos proyectos para 2025 sugiere que la Red global de I+D+i en hidrógeno continúa expandiéndose, lo cual ofrece oportunidades para que Chile se integre a esta ola de innovación y aprendizaje colaborativo.

La *Figura N°107*, revela diferencias notables en la intensidad y temporalidad de los proyectos de investigación en hidrógeno verde entre las instituciones internacionales encuestadas. Institución INT-9 se posiciona claramente como líder, acumulando 245 proyectos desde su inicio y habiendo lanzado 126 iniciativas únicamente desde 2022, lo que denota una capacidad de absorción de recursos y un impulso reciente muy significativo. Del mismo modo, Institución INT-16 e Institución INT-13 muestran trayectorias robustas, con 43 y 15 proyectos iniciados desde 2022, respectivamente, consolidándose como nodos centrales donde convergen tanto experiencia histórica como renovadas convocatorias de financiamiento global.

En contraste, otras instituciones de mediana escala, como Institución INT-8 e Institución INT-10, mantienen un ritmo de trabajo más moderado. Estas cifras indican que, pese a contar con bases históricas en I+D+i, su actividad no creció al mismo ritmo que la de los actores más grandes. Asimismo, Institución INT-11, con ocho proyectos totales, todos iniciados desde 2022 a la fecha, evidencia un

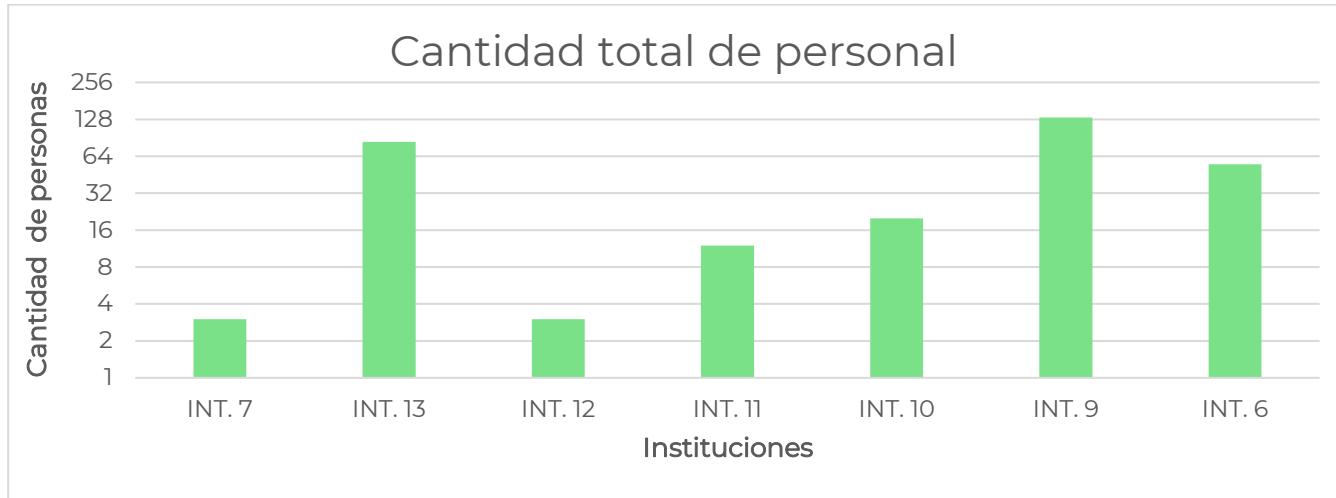
repunte claro en el interés reciente, aunque partiendo de un volumen histórico limitado, lo cual sugiere un proceso de consolidación en marcha.

Por su parte, centros como Institución INT-19, Institución INT-18 e Institución INT-17 se mantienen con una actividad más acotada: apenas tres proyectos en total y ninguno nuevo desde 2022, lo que evidencia que su involucramiento en investigación de hidrógeno verde es todavía incipiente o se encuentra muy focalizado en áreas muy específicas. Instituciones como Institución INT-20 e Institución INT-6 también reflejan un incremento de participación, aunque sin alcanzar la escala de los líderes. En conjunto, este panorama resalta que, mientras Institución INT-9, Institución INT-16 e Institución INT-13 determinan tendencias globales con una productividad histórica y reciente sobresaliente, otras instituciones medianas experimentan un crecimiento progresivo y las de menor escala permanecen en niveles incipientes, ofreciendo oportunidades de fortalecimiento colaborativo para equilibrar capacidades e impulsar redes de cooperación internacionales.



*Figura N°107 Cantidad de proyectos en ejecución o ejecutados por cada una de las instituciones internacionales participantes, aplicado para periodos desde la entrada en funcionamiento hasta la fecha y desde 2022 hasta la fecha. Escala logarítmica base 2. Respuestas 14/20.*

La *Figura N°108*, pone en evidencia la distribución desigual del personal dedicado a actividades de hidrógeno verde y sus derivados entre las instituciones internacionales encuestadas. Institución INT-9 lidera con 132 personas asignadas, seguido de cerca por Institución INT-13 con 84 e Institución INT-6 con 55, lo que subraya que estas entidades disponen de equipos humanos ampliados para desarrollar proyectos y experimentación a gran escala. En contraste, instituciones como Institución INT-7 e Institución INT-12 movilizan equipos de solo tres personas cada una, lo que señala que su capacidad de investigación o ejecución está muy concentrada en grupos pequeños y probablemente focalizados en áreas específicas dentro de la cadena de valor.



*Figura N°108 Cantidad de personas que realizan actividades relacionadas con hidrógeno verde o derivados. Escala logarítmica base 2. Respuestas 7/20.*

Un segundo grupo intermedio lo componen Institución INT-11 e Institución INT-10, cada uno con 20 o menos personas dedicadas a hidrógeno verde y derivados. Estas cifras indican que, aunque no alcanzan el volumen de recursos humanos de los líderes, disponen de equipos suficientemente amplios para acometer proyectos más ambiciosos que los centros de menor escala. Sin embargo, dado que la escala humana suele correlacionarse con la diversidad de líneas de investigación y soporte operativo, estas dos instituciones se posicionan en una fase de consolidación en la que podrían ampliar su plantilla para diversificar iniciativas y mejorar su resiliencia frente a picos de trabajo.

En conjunto, el análisis revela tres niveles de madurez en capacidad humana: instituciones con plantillas robustas, centros de mediana envergadura y aquellos con equipos muy reducidos. Este escenario sugiere que, para equilibrar las colaboraciones internacionales, los centros más grandes podrían compartir parte de su know-how y metodologías de gestión con los más pequeños, facilitando así la formación de recursos técnicos adicionales. Asimismo, quienes cuentan con personal limitado deberían considerar la posibilidad de integrarse en consorcios multisectoriales para reforzar sus capacidades sin necesidad de multiplicar inmediatamente su plantilla.

## 6.1 Proyectos internacionales relacionados con hidrógeno verde y derivados

Los proyectos internacionales de I+D+i en torno al hidrógeno verde y sus derivados han permitido a diversos países avanzar en soluciones tecnológicas aplicables a cada eslabón de la cadena de valor, desde la producción hasta el uso final. Estos proyectos, identificados a través de entrevistas y visitas a terreno en centros de investigación en América, Asia y Europa, han proporcionado información clave sobre las capacidades técnicas, organizacionales y de sostenibilidad de las iniciativas en curso.

En términos generales, los centros internacionales relevados concentran esfuerzos en la validación tecnológica, desarrollo de capacidades locales, producción de insumos críticos (como electrolizadores y celdas de combustible), estrategias de economía circular, y alianzas público-privadas orientadas a la

transferencia tecnológica. Se destacan iniciativas con enfoque en el escalamiento industrial y la integración con otras industrias intensivas en energía.

## 6.1.1 Centros e instituciones internacionales

Esta sección presenta una caracterización general de los proyectos internacionales vinculados al desarrollo de hidrógeno verde y sus derivados, a partir de la información recopilada mediante encuestas, investigación de información pública, entrevistas y visitas a instituciones de I+D+i en distintos países. El análisis se centra en los propósitos institucionales, componentes tecnológicos abordados, modelos de financiamiento y niveles de madurez tecnológica observados. Estos proyectos permiten comprender cómo distintas regiones han avanzado en la implementación de soluciones experimentales, por comerciales e industriales, y constituyen referentes relevantes para el fortalecimiento del ecosistema nacional.

La *Figura N°109*, muestra que las instituciones presentan distintos enfoques en sus estrategias de divulgación científica. Algunas entidades, como la INT-13 e INT-6, concentran una alta producción tanto de publicaciones como de presentaciones, superando las 70 contribuciones cada una, lo que evidencia una participación activa y sostenida en la difusión de conocimiento. Les siguen las instituciones INT-16, INT-9 e INT-20, con entre 40 y 90 aportes, reflejando también un nivel significativo de actividad académica y técnica. Este comportamiento sugiere la existencia de equipos consolidados que combinan la publicación formal de resultados con la participación en congresos y simposios especializados, fortaleciendo su visibilidad dentro del ecosistema de I+D+i en hidrógeno verde. Por otra parte, hay algunas instituciones con alrededor de 20 a 30 contribuciones, lo que indica un trabajo constante, aunque de menor volumen. Finalmente, otras entidades presentan cifras más acotadas, probablemente asociadas a una etapa inicial de consolidación o a líneas de investigación más específicas. En conjunto, el gráfico refleja un panorama equilibrado entre la divulgación académica formal y la difusión técnica en eventos, lo que evidencia un ecosistema activo, con distintos grados de madurez y especialización en materia de investigación en hidrógeno verde.

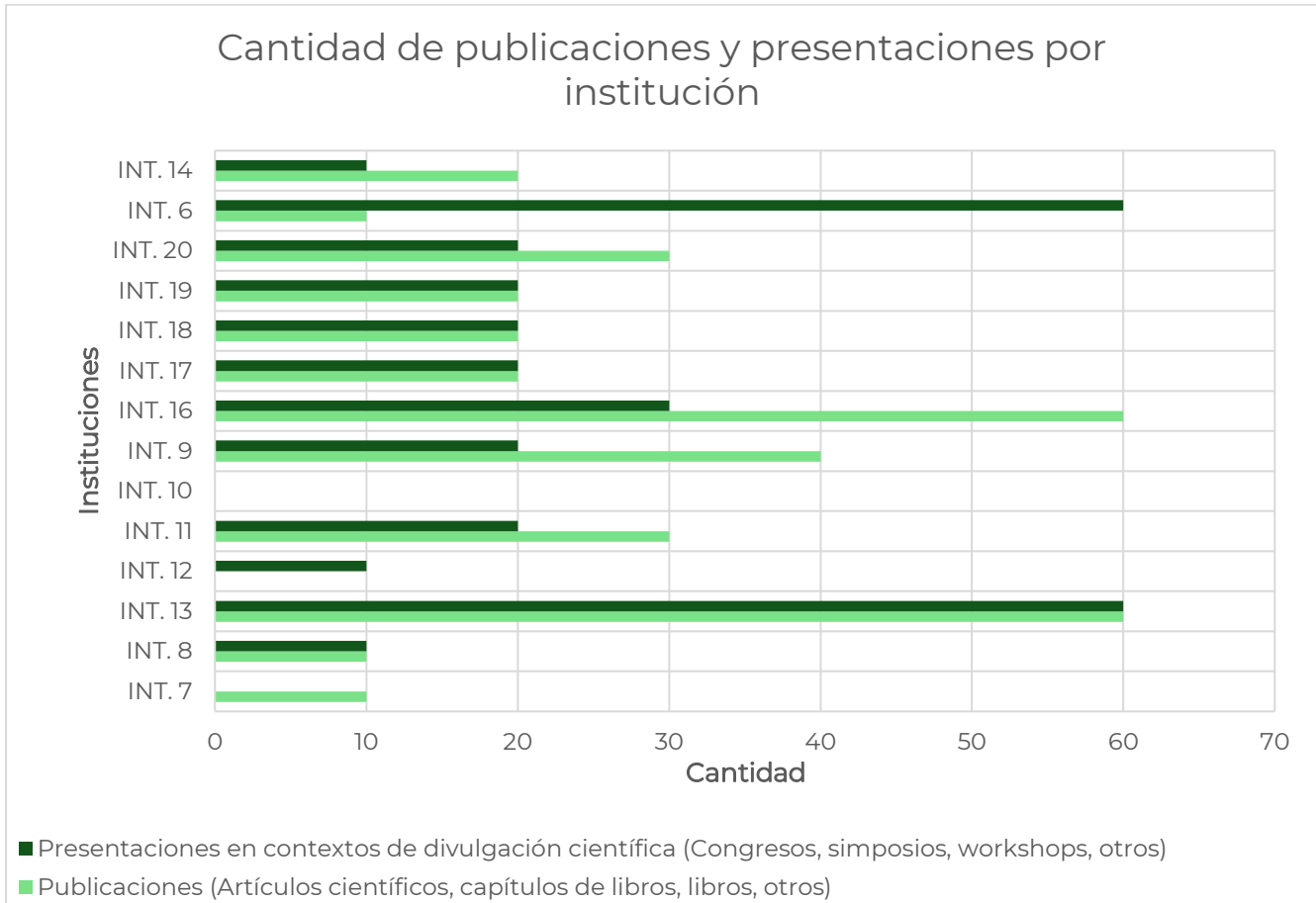


Figura N°109 Cantidad de publicaciones y presentaciones científicas por institución, destacando la participación en congresos, simposios y la producción de artículos o libros. Respuestas 14/20.

En definitiva, se identifica una clara división en las estrategias de difusión científica: algunas instituciones privilegian la publicación formal de sus hallazgos, mientras que otras optan por compartir resultados de manera inmediata en congresos y simposios. Existen también centros que combinan ambos enfoques, y aquellos que están en etapas más tempranas de desarrollo mantienen una actividad más limitada. Para maximizar el alcance y la transferencia de conocimiento, conviene que quienes se centran en la comunicación escrita refuercen su participación en eventos presenciales, y que quienes basan su difusión en presentaciones fortalezcan la producción editorial. De ese modo, se logrará una interacción más dinámica entre la generación de conocimiento académico y su aplicación práctica en el ecosistema del hidrógeno verde.

#### 6.1.1.1 Estructura financiera de los proyectos internacionales

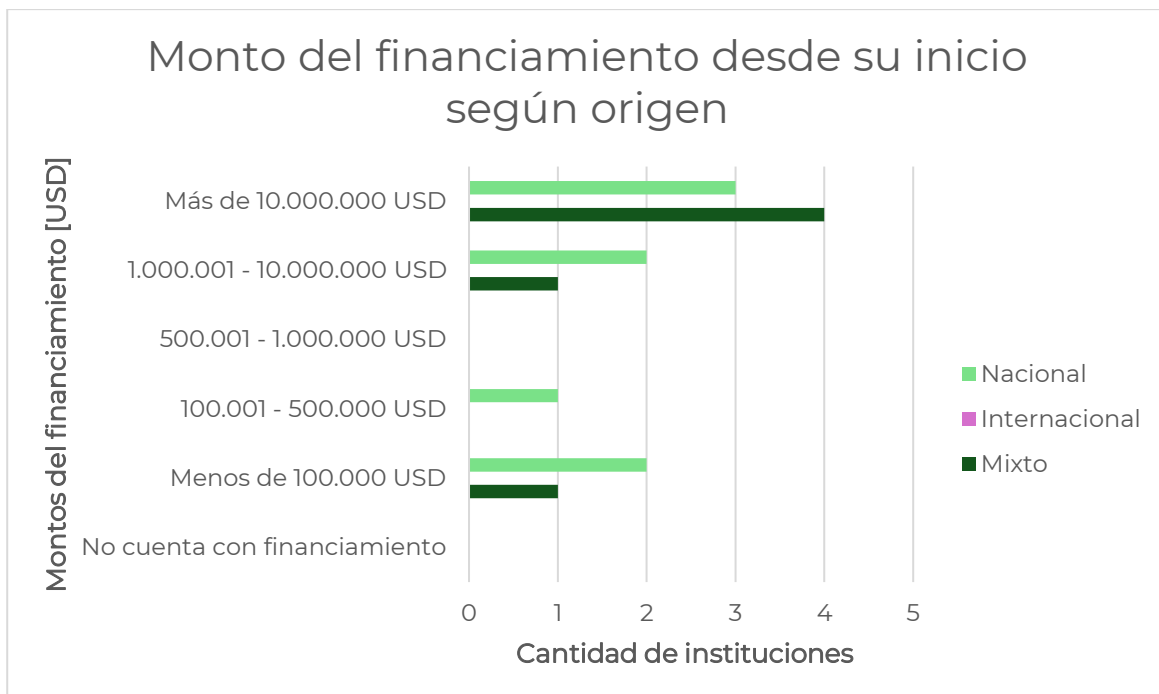
Esta sección aborda la estructura financiera de las instituciones internacionales que desarrollan proyectos vinculados a la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), así como a la formación de personal técnico y profesional en torno al hidrógeno verde, sus derivados y aplicaciones afines. El análisis permite identificar las principales fuentes de financiamiento utilizadas, la composición de los ingresos, y los mecanismos institucionales que hacen posible la sostenibilidad de este tipo de

iniciativas en contextos internacionales. Esta caracterización ofrece insumos relevantes para comprender modelos de gestión y estrategias de inversión que pueden ser adaptadas o replicadas en el contexto nacional.

### 6.1.1.1.1 Financiamiento de las instituciones internacionales

En esta sección se describen las modalidades de financiamiento empleadas por las instituciones internacionales visitadas y entrevistadas. Se consideran fondos públicos de origen nacional o regional (como fondos europeos), financiamiento multilateral, cooperación internacional, alianzas público-privadas, consorcios tecnológicos y otras fuentes de inversión directa. Este análisis permite observar el nivel de coordinación interinstitucional y la articulación entre gobiernos, universidades, empresas y centros de innovación para viabilizar financieramente proyectos complejos vinculados al desarrollo del hidrógeno verde.

La *Figura N°110*, muestra que la mayoría de las instituciones combina fuentes nacionales e internacionales para financiar sus actividades: varias de ellas han obtenido montos mixtos superiores a 10.000.000 USD o en el rango de 1.000.001-10.000.000 USD. Pocas organizaciones dependen exclusivamente de recursos nacionales y prácticamente ninguna carece de financiamiento. Este patrón refleja un alto nivel de coordinación entre fondos públicos, multilaterales y privados, lo que fortalece la sostenibilidad económica de sus proyectos en hidrógeno verde, destacando además que ninguna institución indicó que contara con financiamiento exclusivamente internacional.

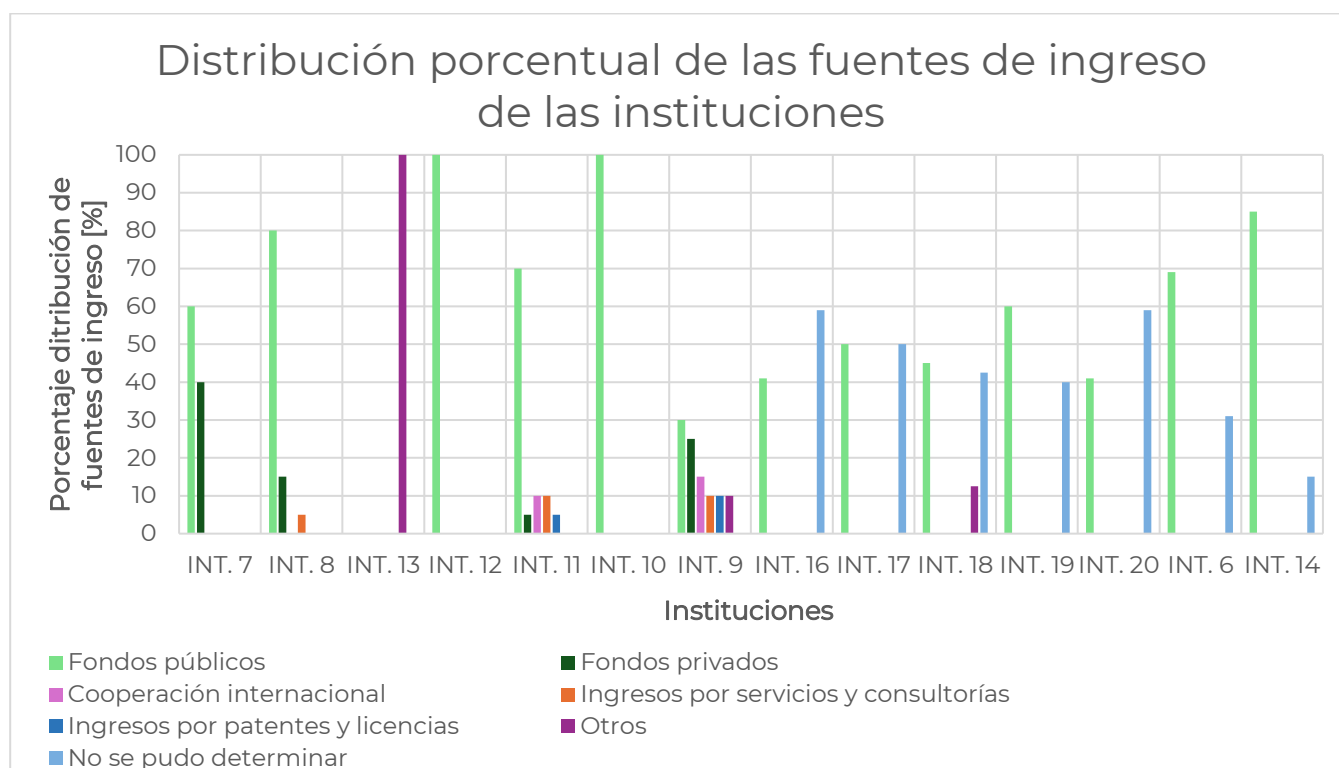


*Figura N°110 Se presenta el monto de financiamiento recibido por las instituciones desde su inicio, clasificado según su origen (nacional, internacional o mixto). Respuestas 14/20.*

### 6.1.1.2 Ingresos de las instituciones internacionales

Esta sección presenta una caracterización general de los ingresos percibidos por las instituciones internacionales incluidas en el estudio. Se identifican las fuentes principales de ingreso y su distribución, incluyendo fondos concursables, ingresos por investigación aplicada, convenios con la industria, subvenciones gubernamentales, proyectos cofinanciados y fondos de cooperación internacional. El análisis permite comprender los modelos de sostenibilidad financiera predominantes en estos centros y su grado de autonomía presupuestaria.

La *Figura N°111*, revela que los fondos públicos siguen siendo la fuente principal de ingresos para la mayoría de las instituciones, cubriendo entre 50% y 100% de sus recursos. Sin embargo, varias organizaciones combinan esta financiación con cooperación internacional y fondos privados para diversificar su base económica. Adicionalmente, algunas entidades obtienen ingresos modestos por patentes y licencias, mientras que otras integran consultorías o servicios especializados en su modelo de ingresos. Este mosaico de fuentes sugiere que, aunque los recursos estatales siguen siendo clave, la colaboración internacional, los aportes privados y la generación de rentas propias son cada vez más relevantes para sostener proyectos avanzados en hidrógeno verde.

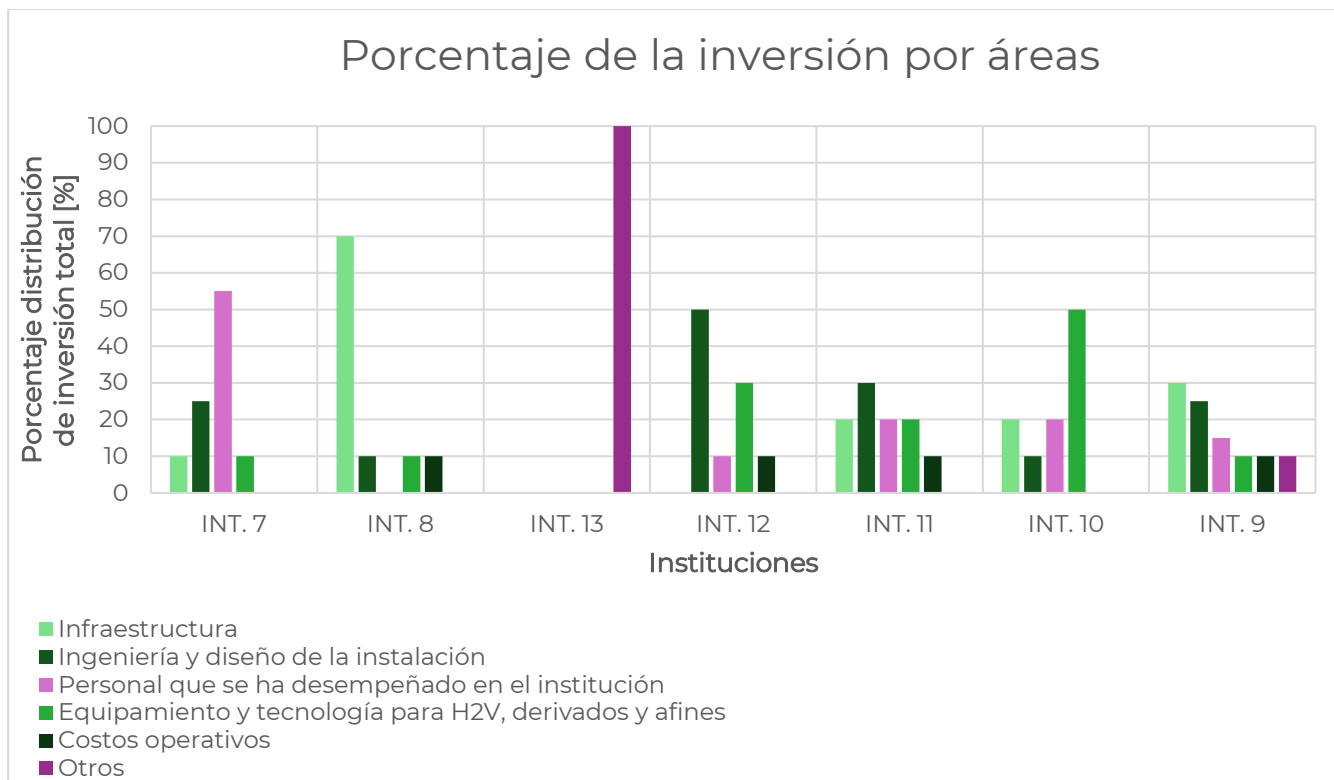


*Figura N°111 Distribución porcentual de las fuentes de ingreso, con predominio de fondos públicos, cooperación internacional y patentes, además de categorías institucionales como fondos privados. Respuestas 14/20.*

### 6.1.1.1.3 Inversión de las instituciones internacionales

A partir de la información recopilada, esta sección analiza la distribución de la inversión realizada por las instituciones internacionales en áreas clave para la implementación de proyectos de I+D+i y formación de personal. Se consideran categorías como infraestructura, ingeniería y diseño de instalaciones, contratación de personal especializado, adquisición de equipamiento tecnológico y didáctico, costos operativos y otros conceptos asociados.

La *Figura N°112*, muestra el promedio general del porcentaje de inversión por área, evidenciando tendencias comunes entre instituciones de referencia. En conjunto, ambas figuras permiten identificar patrones de inversión que pueden servir como referencia para el diseño de estrategias nacionales.



*Figura N°112 Porcentaje de inversión total asignado por áreas estratégicas (E&M, ITC, CNH2) y rubros institucionales como infraestructura y equipamiento tecnológico. Respuestas 7/20.*

Cada institución distribuye su inversión de manera diferenciada según sus prioridades estratégicas. Institución INT-7 destina la mayor parte de los recursos a personal, seguido de costos operativos e infraestructura, mientras que Institución INT-9 equilibra inversión entre equipamiento tecnológico, ingeniería y diseño y costos operativos. Institución INT-8 concentra casi toda su inversión en infraestructura para hidrógeno, reflejando un enfoque en capacidad técnica, mientras que Institución INT-13 dedica el 100% de sus recursos a otras áreas de inversión no consideradas. Por su parte, Institución INT-12 reparte su presupuesto entre equipos, ingeniería e infraestructura, e Institución INT-11 prioriza costos operativos y equipos. Institución INT-10, en cambio, invierte principalmente en

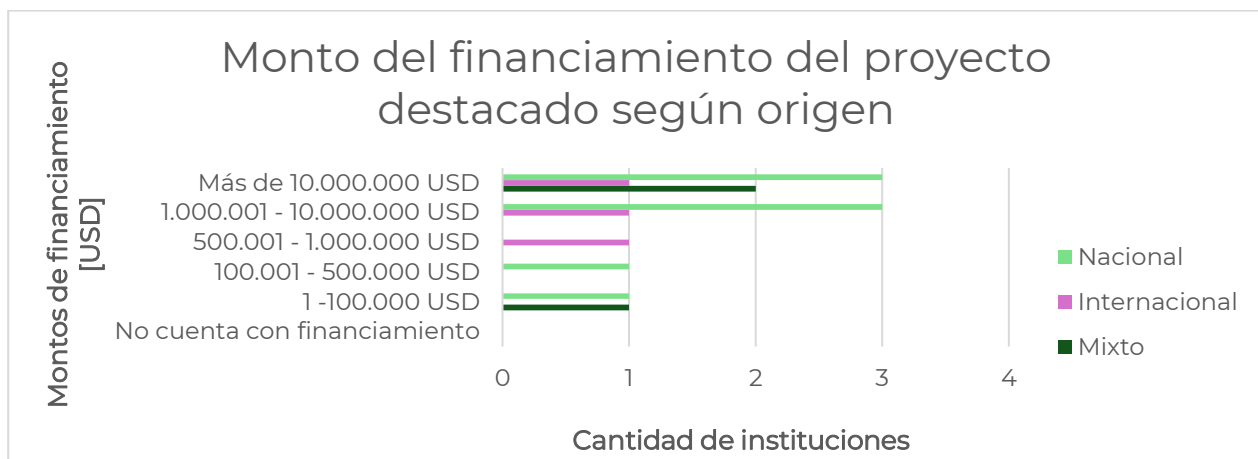
ingeniería y tecnología. Estos patrones evidencian que, aunque la mayoría de las instituciones reconoce la importancia del equipamiento tecnológico, también existen diferencias marcadas en cómo se distribuyen los recursos entre infraestructura física, desarrollo de personal y operaciones, lo que refleja distintas etapas de madurez y enfoques operativos dentro del ecosistema de I+D+i en hidrógeno verde.

#### 6.1.1.1.4 Financiamiento de proyecto destacado de instituciones internacionales

Esta sección presenta un caso destacado de financiamiento identificado en una de las instituciones internacionales visitadas. El proyecto seleccionado integra componentes de investigación, desarrollo tecnológico y formación de personal, y se considera ejemplar por su modelo estratégico. Se describen las fuentes de financiamiento utilizadas, los mecanismos de gestión, y los aprendizajes obtenidos, con el propósito de identificar elementos replicables o adaptables para el contexto chileno.

La *Figura N°113*, evidencia que, en los proyectos destacados de las instituciones internacionales, los montos de financiamiento tienden a agruparse en rangos intermedios y altos, con una clara predominancia de fuentes mixtas. En el tramo 500.001-1.000.000 USD, se observa un aporte mixto que supera al nacional e internacional por sí solos, lo que sugiere que los proyectos más sólidos combinan fondos públicos con cooperación externa o capital privado para garantizar viabilidad y continuidad. Por su parte, en la categoría 1.000.001-10.000.000 USD, aparecen únicamente financiamientos mixtos, lo cual indica que cuando los montos escalan hacia cifras multimillonarias, los proyectos dependen inevitablemente de la articulación entre distintas fuentes (públicas y privadas, locales e internacionales) para compartir riesgos y recursos.

En el rango Más de 10.000.000 USD, la corriente mixta vuelve a tomar protagonismo, aunque aparece un financiamiento nacional aislado en este umbral, lo que demuestra que algunos proyectos de gran envergadura cuentan con respaldo exclusivamente interno, pero de forma muy minoritaria. El financiamiento internacional en esta horquilla es prácticamente inexistente, subrayando que ninguna institución confía únicamente en aportes de entidades foráneas para iniciativas cuyo impacto y alcance exigen recursos cuantiosos.



*Figura N°113 Distribución del monto de financiamiento de proyectos destacados según su origen, clasificando fondos nacionales, internacionales y mixtos en diferentes rangos de inversión. Respuestas 14/20.*

Esta distribución pone de relieve la importancia de la coordinación interinstitucional y la diversificación de fuentes de recursos. Los proyectos exitosos combinan fondos públicos, privados y cooperaciones internacionales en diferentes etapas, escalando según la complejidad y el ámbito de aplicación. El hecho de que los montos mixtos lideren en los rangos medios y altos confirma que un modelo híbrido de financiamiento resulta fundamental para sustentar iniciativas de I+D+i en hidrógeno verde con visión de largo plazo y alto impacto.

## 6.1.2 Proyecto destacado de las instituciones internacionales

En esta sección se describe un caso emblemático de financiamiento identificado entre las instituciones internacionales entrevistadas. El proyecto seleccionado combina investigación, desarrollo tecnológico y formación de personal en el ámbito del hidrógeno verde. Se detallan las fuentes de financiamiento empleadas, los mecanismos de gestión y los aprendizajes obtenidos, con el fin de extraer lecciones replicables para el contexto chileno. Este ejemplo ilustra cómo se articulan recursos nacionales e internacionales en una iniciativa de gran envergadura, ofreciendo un modelo estratégico que permite viabilizar técnicas avanzadas y garantizar la sostenibilidad financiera a lo largo de las distintas etapas de implementación. A continuación, se presenta la *Tabla N°30*, en la cual se detallan las instituciones internacionales, el título de su proyecto destacado, la fecha de inicio, la fecha de término y si dicho proyecto ya ha finalizado o permanece en curso.

*Tabla N°30 Proyecto destacado de las instituciones internacionales con temporalidad de inicio y término del proyecto, indicando además si el proyecto está o no finalizado. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Inicio del proyecto	Término del proyecto	Proyecto finalizado
Institución INT-7	DESARROLLO DE UN QUEMADOR DE HIDROGENO	1er semestre 2022	1er semestre 2024	Sí
Institución INT-8	HIDROKER - Estudio experimental a nivel de laboratorio-piloto de la cocción de materiales cerámicos utilizando hidrógeno como combustible	1er semestre 2020	2do semestre 2023	Sí
Institución INT-13	FCH2RAIL - Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Application	1er semestre 2020	2do semestre 2025	Sí
Institución INT-12	Design and construction of a PEM electrolyzer with control and automation system.	2do semestre 2024	1er semestre 2025	Sí
Institución INT-11	1. Diplomado en producción y uso del hidrógeno 2. Entrenamiento en power to X 3. Power to gas 4. Combustión del hidrogeno	1er semestre 2021	2do semestre 2025	-
Institución INT-10	Champagne Urbana Refueling Station	-	-	Sí
Institución INT-9	Ordos "Wind-Solar-Hydrogen-Storage" Integrated Project	1er semestre 2022	2do semestre 2024	Sí
Institución INT-16	"Producción de Amoníaco Renovable Utilizando Hidrógeno de un Electrólito"	2do semestre 2018	1er semestre 2023	Sí

Institución INT-17	Energiepark Mainz - Producción de hidrógeno verde con integración a la red y movilidad	1er semestre 2015	2do semestre 2017	Sí
Institución INT-18	H2Xport Pilot Plant	2do semestre 2018	2do semestre 2023	Sí
Institución INT-19	HEPP (Hydrogen Energy and Power-to-X Platform) Project	2do semestre 2018	2do semestre 2024	Sí
Institución INT-20	GeoPura Hydrogen Power Unit (HPU)	2do semestre 2019	2do semestre 2025	No
Institución INT-6	BIG HIT	1er semestre 2016	2do semestre 2020	Sí
Institución INT-14	HyDeploy	1er semestre 2019	Primer semestre 2021	Sí

A continuación, en la *Tabla N°31*, se muestra el objetivo principal y la descripción del proyecto emblemático de las instituciones internacionales participantes.

*Tabla N°31 Objetivo y descripción del proyecto destacado de cada institución internacional. Objetivo y descripción traducidos al español. Algunos han sido traducidos al español. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Objetivo principal	Descripción
Institución INT-7	DESARROLLO DE UN QUEMADOR DE HIDROGENO	FABRICACION PROTOTIPO QUEMADOR DE HIDROGENO	Proceso de cálculo, diseño y fabricación de un quemador
Institución INT-8	HIDROKER - Estudio experimental a nivel de laboratorio-piloto de la cocción de materiales cerámicos utilizando hidrógeno como combustible	Estudiar la combustión de hidrógeno para la cocción de baldosas cerámicas y la afección de la atmosfera a los productos cerámicos a nivel de laboratorio-piloto de la cocción de materiales cerámicos utilizando hidrógeno como combustible	Tareas de combustión, modelización, experimentación y cocción de materiales cerámicos
Institución INT-13	FCH2RAIL - Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Application	Desarrollar y demostrar una tecnología ferroviaria híbrida impulsada por hidrógeno que integre pilas de combustible y baterías, con el objetivo de descarbonizar el transporte ferroviario.	El proyecto FCH2RAIL se centra en el diseño, construcción y validación de un prototipo de tren híbrido propulsado por hidrógeno que utilice la tecnología de las pilas de combustible. Las actividades de formación del proyecto hacen hincapié en la creación de capacidades relacionadas con las tecnologías ecológicas del hidrógeno, el funcionamiento de las pilas de combustible, los procedimientos de seguridad y la integración en los sistemas ferroviarios. El proyecto pretende crear conocimientos especializados y facilitar la transferencia de conocimientos para mejorar los sectores del hidrógeno ecológico y el transporte sostenible en Europa.

Institución INT-12	Design and construction of a PEM electrolyzer with a control and automation system.	Diseñar y construir un electrolizador nacional tipo PEM para promover el desarrollo tecnológico en La Guajira.	Diseña y construye un electrolizador PEM con sensor y control de presión, caudal de hidrógeno, nivel de agua, alarmas de seguridad de chimenea, etc.
Institución INT-11	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diplomado en producción y uso del hidrógeno</li> <li>2. Entrenamiento en power to x</li> <li>3. Power to gas</li> <li>4. Combustión del hidrogeno</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Transferir y apropiar conocimientos y estado del arte, para entender la configuración, funcionamiento y manejo de la cadena tecnológica y de valor del hidrógeno</li> <li>2. Estudiar los aspectos técnicos, económicos, regulatorios y criterios de sostenibilidad de los PTX</li> </ol>	Producción de hidrógeno verde, hidrógeno azul. Almacenamiento en fase gaseosa y líquida.
Institución INT-10	Champagne Urbana Refueling Station	Estación de carga - Producción in situ	Electrolizador de 1 MW + compresión de 500 bar, diseñado para dar servicio a unos 15 autobuses FCEV al día.
Institución INT-9	Ordos "Wind-Solar-Hydrogen-Storage" Integrated Project	Una iniciativa sin precedentes en Mongolia Interior, China, concebida para crear sinergias entre la generación de energías renovables y la producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno.	El proyecto de Ordos ejemplifica un enfoque holístico de la descarbonización, aprovechando las tecnologías eólica, solar y del hidrógeno para construir un ecosistema energético escalable y bajo en carbono. No solo responde a las necesidades energéticas locales, sino que sirve de modelo para la transición de las regiones del mundo de los combustibles fósiles a los sistemas de hidrógeno renovable.
Institución INT-16	"Producción de Amoníaco Renovable Utilizando Hidrógeno de un Electrólito"	Desarrollar un método innovador para sintetizar amoníaco (NH <sub>3</sub> ) utilizando hidrógeno (H <sub>2</sub> ) renovable y nitrógeno (N <sub>2</sub> ) del aire, con un consumo energético y presión de operación significativamente menores en comparación con el proceso Haber-Bosch convencional.	En el núcleo del proyecto se encontraba un reactor con membrana metálica, diseñado para operar entre 30 y 50 bar y a 450 °C, en comparación con los más de 150 bar requeridos en la síntesis tradicional de amoníaco. La innovación clave fue una membrana delgada de aleación de paladio que permitía el paso selectivo de hidrógeno para reaccionar con el nitrógeno al otro lado. Este enfoque evitaba la necesidad de compresores voluminosos y ciclos de reciclaje a alta presión, simplificando significativamente el sistema.
Institución INT-17	Energiepark Mainz - Producción de hidrógeno verde con integración a la red y movilidad	Desarrollar y operar una planta de electrólisis PEM de escala industrial para producir hidrógeno verde a partir de excedentes de energías renovables, permitiendo su inyección en la red de gas, suministro a la industria, y movilidad con buses de hidrógeno.	La planta fue diseñada específicamente para utilizar el excedente de electricidad de los parques eólicos regionales, convirtiéndolo en hidrógeno como portador de energía limpia. Esto permite integrar fuentes renovables intermitentes en el sistema energético al almacenar el excedente de energía en forma química. El hidrógeno se utiliza para inyección en la red de gas natural local, para suministro a usos industriales, y para alimentar transporte público a hidrógeno como autobuses de celda de combustible en Mainz. El proyecto también incluye sistemas avanzados de control y automatización proporcionados por Siemens para mejorar la eficiencia y la compatibilidad con la red.
Institución INT-18	H2Xport Pilot Plant	Desarrollar un sistema escalable y descentralizado de producción de hidrógeno verde a partir de fuentes de energía renovable. Enfocado en aplicaciones remotas u orientadas a la exportación,	La planta utiliza energía solar de una combinación de paneles fotovoltaicos concentrados (CPV) y paneles solares de silicio para alimentar unidades de almacenamiento por baterías y sistemas de electrólisis. El sistema incluye purificación de agua (desalinización), generación de hidrógeno mediante electrólisis de membrana de intercambio protónico

		el proyecto gira en torno a una planta piloto modular de 50 kW	(PEM) y de membrana de intercambio aniónico (AEM), almacenamiento en tanques de reserva o cilindros, y reconversión opcional mediante una celda de combustible de hidrógeno.
Institución INT-19	HEPP (Hydrogen Energy and Power-to-X Platform) Project	Convertir el excedente de electricidad renovable en metano sintético para crear una solución de almacenamiento climáticamente neutra para el futuro energético	El núcleo de la planta es una electrólisis de alta temperatura (SOEC) para la producción de hidrógeno y una "metanación" catalítica, que convierte hidrógeno con CO <sub>2</sub> en metano. Con una eficiencia general de hasta el 72% y una planta piloto a escala de 10 kW, HEPP demuestra la viabilidad de esta tecnología para aplicaciones industriales.
Institución INT-20	GeoPura Hydrogen Power Unit (HPU)	Reemplazar los generadores diésel por unidades móviles de suministro de energía basadas en hidrógeno, sin emisiones.	Unidades de energía de hidrógeno (HPUs), que están equipadas con pilas de combustible PEM, sistemas integrados de baterías de iones de litio, así como componentes electrónicos de potencia y de seguridad. Cada HPU ofrece una salida eléctrica de 250 kW (o 500 kW en el modelo HPU2) y puede operar tanto en paralelo a la red como de manera autónoma.
Institución INT-6	BIG HIT	Crear el primer territorio del hidrógeno de Europa en una región insular de Escocia	BIG HIT se basó en el proyecto piloto de hidrógeno Surf 'n' Turf de las Orcadas. El proyecto pretendía crear los primeros territorios del hidrógeno de Europa en las islas Orcadas mediante el desarrollo de un sistema energético de hidrógeno ecológico y pretendía demostrar un enfoque integrado de la producción, almacenamiento, transporte y utilización del hidrógeno para calefacción, electricidad y transporte. En la isla de Shapinsay se instaló un electrolizador de 1 MW, gestionado por ITM Power y situado junto a la turbina eólica comunitaria de la isla, con el fin de producir hidrógeno utilizando la energía de la turbina cuando se produjeran restricciones (cuando no se pudiera generar electricidad para la red nacional debido a limitaciones de la red local). El hidrógeno producido podría almacenarse y transportarse para su uso en aplicaciones finales locales. Entre las aplicaciones finales instaladas en el marco del proyecto figuran una caldera catalítica alimentada con hidrógeno en la Escuela Comunitaria de Shapinsay, que cubre parte de la demanda de calor, y una estación de repostaje de hidrógeno ITM en Kirkwall, que alimenta una flota de cinco furgonetas municipales eléctricas (cada una equipada con extensiones de autonomía de pila de combustible de hidrógeno). Como legado de estos proyectos pioneros, las Islas Orcadas son uno de los primeros lugares en desplegar activos a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno y están ampliamente reconocidas como uno de los primeros «territorios del hidrógeno» de Europa. Al explorar enfoques integrados para la producción, almacenamiento, transporte y uso final del hidrógeno, se adquirió un aprendizaje significativo sobre el despliegue, mantenimiento y funcionamiento de los activos, con muchos retos operativos afrontados a lo largo del proyecto. Los conocimientos adquiridos, como el diseño de la pila del electrolizador, la integración del sistema y la selección de materiales, se han incorporado al desarrollo de las instalaciones de EMEC en Eday y han contribuido a un desarrollo más amplio de la industria y la tecnología. Además, se ha profundizado en el conocimiento de la logística del hidrógeno, lo que ha permitido a EMEC desarrollar procedimientos

			operativos estándar para el transporte de hidrógeno por carretera y ferry. <i>Financiado por FCH-JU en el programa Horizon 2020 de la Unión Europea.</i>
Institución INT-14	HyDeploy	Demostrar que el hidrógeno podía mezclarse de forma segura con metano sin requerir cambios importantes en la infraestructura o los electrodomésticos existentes.	El proyecto implicó el suministro de una mezcla de gas enriquecida con hidrógeno a más de 100 edificios universitarios y viviendas del personal docente, monitoreando el rendimiento, la seguridad y la aceptación por parte de los usuarios. Los resultados confirmaron que la mezcla de hidrógeno es una solución viable a corto y medio plazo para reducir las emisiones de carbono derivadas de la calefacción.

Diversos proyectos internacionales comparten líneas de investigación centradas en la integración de electrolizadores y el aprovechamiento de fuentes renovables para la producción de hidrógeno verde. Iniciativas como INT-9, INT-17, INT-18, INT-19 y INT-12 coinciden en desarrollar y optimizar tecnologías de electrólisis (PEM, AEM y SOEC) con el objetivo de transformar excedentes de energía eólica o solar en hidrógeno, fortaleciendo la conexión entre generación renovable y almacenamiento energético. De manera complementaria, proyectos como INT-16 e INT-19 exploran arquitecturas que combinan generación renovable, almacenamiento y conversión en derivados energéticos como amoníaco o metano, bajo un enfoque integral de descarbonización que abarca desde la producción hasta el uso final. Esta convergencia refleja la prioridad global de habilitar cadenas completas de valor en torno al hidrógeno verde, impulsando soluciones tecnológicas que aprovechen al máximo los recursos renovables disponibles.

Un segundo grupo de proyectos se orienta hacia la validación de aplicaciones concretas y procesos de valor agregado. Iniciativas como INT-13 e INT-14 avanzan en la descarbonización del transporte mediante la incorporación del hidrógeno en sistemas ferroviarios híbridos y en mezclas seguras con gas natural, demostrando la viabilidad técnica y operativa del hidrógeno en sectores industriales y de movilidad. Por su parte, INT-6 e INT-10 destacan el despliegue de plantas piloto y estaciones de recarga que permiten inyectar hidrógeno en redes energéticas o abastecer flotas de vehículos, evidenciando la importancia de la infraestructura de acondicionamiento (compresión, purificación y almacenamiento) y de la formación de personal especializado para su operación y mantenimiento.

Finalmente, proyectos como INT-7 e INT-8 abordan aplicaciones de combustión directa en procesos térmicos, mediante el desarrollo de quemadores y la experimentación en hornos cerámicos a escala piloto. Estas iniciativas permiten estudiar el comportamiento del hidrógeno como combustible en condiciones de alta temperatura y evaluar su impacto sobre distintos materiales. En conjunto, la diversidad de enfoques refleja una visión transversal que abarca desde el diseño y prototipado de equipos de producción hasta la conversión en derivados, la integración en redes energéticas y las aplicaciones finales en transporte e industria. Esta articulación de esfuerzos internacionales ofrece aprendizajes valiosos para orientar la hoja de ruta chilena hacia desarrollos tecnológicos alineados con las mejores prácticas globales en I+D+i de hidrógeno verde.

La *Figura N°114*, muestra que casi todos los proyectos destacados abarcan varios eslabones de la cadena de valor del hidrógeno verde. La mayoría incluye “Uso final”, evidenciando el interés por demostrar aplicaciones reales. Al mismo tiempo, muchas iniciativas incorporan “Transporte y distribución” y “Acondicionamiento y almacenamiento”, lo cual refleja la necesidad de gestionar la logística del hidrógeno verde, desde la compresión hasta la inyección en redes o el suministro a flotas. Menos frecuentes son los proyectos centrados únicamente en “Producción”; en su mayoría, la generación de hidrógeno se entiende como parte de un sistema más amplio. Finalmente, unas pocas

iniciativas tocan “Reconversión (Derivados)”, caso de institución INT-16, INT-19 e INT-20, que buscan producir amoníaco o metanol sintético. En conjunto, se percibe un claro enfoque multidimensional: pocos proyectos se limitan a un solo ámbito, sino que intentan integrar producción, acondicionamiento, transporte y uso en un mismo esfuerzo.



Figura N°114 Temáticas que considera el proyecto destacado de cada institución internacional. Respuestas 14/20.

La Tabla N°32, muestra que los proyectos destacados cubren un amplio espectro de aplicaciones del hidrógeno y sus derivados, con resultados que evidencian tanto avances tecnológicos como impactos formativos y de demostración. A pesar de la diversidad de objetivos y alcances de los proyectos destacados, pueden identificarse varias coincidencias que reflejan tendencias compartidas y que refuerzan los diagnósticos expuestos en otras secciones del informe.

*Tabla N°32 Resultados obtenidos en el proyecto destacado de cada una de las instituciones internacionales. Algunos han sido traducidos al español. Instituciones 14.*

Institución	Título del proyecto	Resultados obtenidos
Institución INT-7	DESARROLLO DE UN QUEMADOR DE HIDROGENO	Puesta en operación quemador de hidrogeno
Institución INT-8	HIDROKER - Estudio experimental a nivel de laboratorio-piloto de la cocción de materiales cerámicos utilizando hidrógeno como combustible	Conocimiento en combustión 100% hidrógeno y afección vapor de agua a producto cerámico
Institución INT-13	FCH2RAIL - Fuel Cell Hybrid PowerPack for Rail Application	El proyecto FCH2RAIL ha demostrado con éxito la viabilidad de los trenes híbridos impulsados por hidrógeno, validando su rendimiento técnico, eficiencia energética y reducción de emisiones en condiciones de funcionamiento reales. Entre los principales resultados públicos figuran unas directrices completas para integrar las tecnologías de pilas de combustible de hidrógeno en los sistemas ferroviarios, protocolos detallados de seguridad y mantenimiento y materiales de formación especializados de libre acceso. Además, el proyecto ha llevado a cabo numerosas actividades de difusión, talleres e informes de acceso público destinados a sensibilizar a las partes interesadas y facilitar la adopción de soluciones ecológicas basadas en el hidrógeno en el sector ferroviario.
Institución INT-12	Design and construction of a PEM electrolyzer with a control and automation system.	Se logró construir un generador tipo PEM y transferir este conocimiento a la comunidad universitaria de la Universidad de La Guajira
Institución INT-11	1. Diplomado en producción y uso del hidrógeno 2. Entrenamiento en power to x 3. Power to gas 4. Combustión del hidrogeno	-
Institución INT-10	Champagne Urbana Refueling Station	Cargar autobuses a 500 bares con hidrógeno verde.
Institución INT-9	Ordos "Wind-Solar-Hydrogen-Storage" Integrated Project	El proyecto de Ordos ya ha demostrado el potencial de la producción de hidrógeno verde a gran escala y de la descarbonización industrial. Mientras que la Fase 1 ha proporcionado una infraestructura básica y un éxito piloto, las Fases 2-3 se centrarán en la utilización del hidrógeno a gran escala, la innovación en el almacenamiento y el impacto climático intersectorial, aspectos críticos para alcanzar los objetivos de doble carbono de China.
Institución INT-16	"Producción de Amoníaco Renovable Utilizando Hidrógeno de un Electrólito"	Durante las pruebas, se lograron concentraciones de amoníaco de hasta un 7,5% en volumen, con eficiencias de conversión de hasta el 14,5%, superando así los resultados de un reactor Haber-Bosch de paso único.
Institución INT-17	Energiepark Mainz - Producción de hidrógeno verde con integración a la red y movilidad	Producción continua de ~180 toneladas/año de hidrógeno verde desde 2017. Integración exitosa con la red eléctrica local para inyección de H <sub>2</sub> . Uso en buses de transporte público y aplicaciones industriales. Validación operativa del sistema PEM SILYZER 200. Reconocido como "Hito Sobresaliente" en 2017 por "Land of Ideas". Proyecto replicable en otras regiones. Evaluación continua de eficiencia y sostenibilidad con soporte académico.
Institución INT-18	H2Xport Pilot Plant	La instalación no solo respalda la investigación experimental, sino también pruebas prácticas de nuevas químicas de baterías y tecnologías de electrólisis. Su estructura modular

		flexible la hace ideal para modelar futuras soluciones de exportación y almacenamiento de hidrógeno.
Institución INT-19	HEPP (Hydrogen Energy and Power-to-X Platform) Project	Producción de hidrógeno y una “metanación” catalítica, que convierte hidrógeno con CO <sub>2</sub> en metano. Con una eficiencia general de hasta el 72% y una planta piloto a escala de 10 kW, además de actualmente ser utilizado como plataforma de investigación para desarrollos posteriores en el ámbito del acoplamiento de sectores y las energías renovables.
Institución INT-20	GeoPura Hydrogen Power Unit (HPU)	Las HPUs ya se están utilizando en una amplia variedad de aplicaciones: en proyectos de infraestructura, por ejemplo, por empresas constructoras como BAM, Skanska y Balfour Beatty.
Institución INT-6	BIG HIT	Demostrar un Valle del Hidrógeno replicable utilizando energía renovable local restringida para producir hidrógeno. Explorar las aplicaciones locales del hidrógeno como almacén flexible de energía local y vector de combustible. Las lecciones aprendidas incluyen técnicas de producción, almacenamiento y transporte por carretera y transbordador, así como la demostración de casos de uso final.
Institución INT-14	HyDeploy	Los resultados confirmaron que la mezcla de hidrógeno es una solución viable a corto y medio plazo para reducir las emisiones de carbono derivadas de la calefacción.

### Enfoque integral en la cadena de valor

Casi todos los proyectos analizados integran etapas de producción, acondicionamiento, almacenamiento y uso final del hidrógeno o de sus derivados, reflejando una visión sistémica de la cadena de valor. Por ejemplo, la institución INT-17 produce hidrógeno verde mediante electrólisis, lo inyecta en la red de gas y lo utiliza tanto en aplicaciones industriales como en flotas de transporte público; la institución INT-14 valida la mezcla segura de hidrógeno con gas natural en redes de distribución existentes, y la institución INT-6 implementa un modelo territorial que abarca desde la generación con energías renovables hasta el suministro en entornos insulares. Este enfoque integrado coincide con las necesidades detectadas a lo largo de toda la cadena, que destacan la importancia de articular no solo electrolizadores, sino también sistemas de compresión, almacenamiento y aplicación final, con el fin de consolidar un ecosistema experimental completo y funcional.

### Énfasis en la validación a escala piloto o semiindustrial

Proyectos como INT-8 e INT-16 trascienden la simple electrólisis de laboratorio: generan rutas de valor agregado y validan procesos en condiciones próximas a escala real. Este rasgo refleja una necesidad identificada en “Equipamiento científico y tecnológico” que, aunque se dispone de equipamiento de laboratorio, faltan reactores y plantas piloto para desarrollar y certificar procesos de síntesis de derivados.

### Integración de fuentes renovables con electrólisis

Institución INT-7 e institución INT-17 ilustran claramente que unir energía eólica/solar a electrólisis habilita sistemas más resilientes. Esa misma necesidad había emergido en el análisis de

“Infraestructura”, donde la falta de compatibilización entre generación renovable y electrólisis localmente disponible se mencionó como una de las principales barreras para proyectos en regiones extremas. El caso institución INT-9, que utiliza excedentes eólicos para producir H<sub>2</sub>, ejemplifica cómo esa integración puede mejorar la eficiencia y viabilidad.

### Formación, protocolos de seguridad y difusión del conocimiento

institución INT-13 no solo implementó un tren híbrido, sino que generó protocolos de seguridad, materiales de formación y directrices públicas. Ese foco en la capacitación y estandarización con las prioridades de corto plazo que señalan la urgencia de contar con bancos de prueba y protocolos claros para operación y mantenimiento. En el informe, se mencionó que buena parte del equipamiento disponible es experimental y que falta implementar capacitaciones formales, el caso de institución INT-13 ejemplifica cómo un proyecto puede cubrir ambas dimensiones.

### Sinergias público-privadas y replicabilidad

Proyectos como institución INT-6 e institución INT-9 se han apoyado en alianzas entre empresas, gobiernos y centros de investigación. Esto enlaza con los hallazgos de la sección “Colaboración y Redes”, donde se constató que la ausencia de canales formales dificulta compartir infraestructura y recursos. Estos casos demuestran que, cuando existe un marco de colaboración consolidado, se aceleran los resultados y se facilitan réplicas en otros territorios.

En síntesis, los proyectos internacionales destacados confirman muchas de las brechas detectadas en el levantamiento nacional como la necesidad de infraestructura de escala piloto, protocolos de seguridad y personal capacitado. A su vez, muestran modelos de integración de energías renovables y de colaboración interinstitucional que pueden inspirar a los centros chilenos a cerrar esas brechas y avanzar hacia soluciones robustas y escalables. Los resultados presentados en estos proyectos se alinean con varias de las políticas públicas internacionales como las establecidas por la Unión Europea con FCH-JU [9] o por Estados Unidos con el programa Oneshot [13].

La *Figura N°115*, revela que el principal resultado de los proyectos destacados ha sido la generación de nuevos productos o servicios, seguido de cerca por la implementación de nueva. Un nuevo proceso representa el 26%, lo cual indica un esfuerzo significativo en optimizar o crear metodologías dentro de la cadena de valor del hidrógeno verde. En contraste, la obtención de patentes y la adquisición de experiencia específica son resultados menos frecuentes, lo que sugiere que, si bien la innovación tecnológica existe, el enfoque predominante está en producir activos tangibles, productos, infraestructuras y procesos, antes que en la protección intelectual o la transferencia formal de conocimientos.

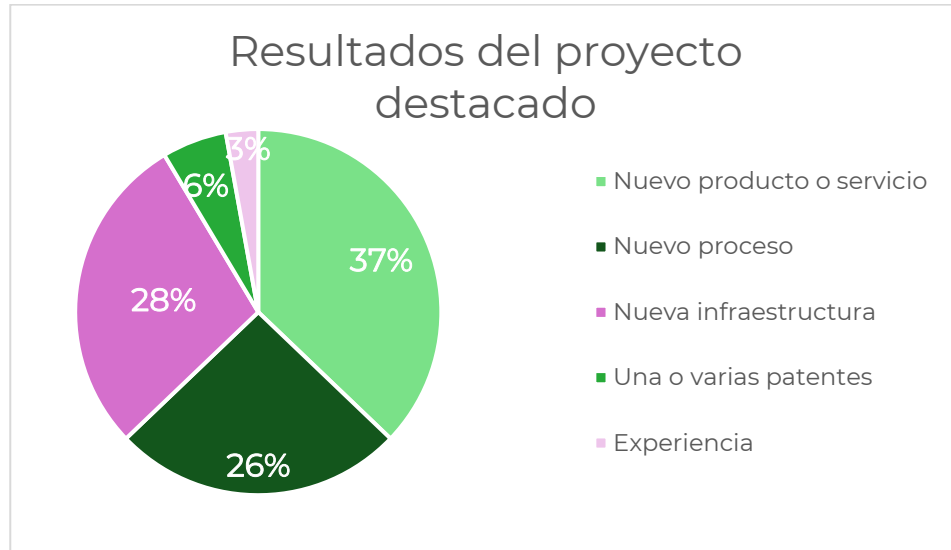


Figura N°115 Resultados principales alcanzados por los proyectos destacados, incluyendo desarrollo de nuevos productos, procesos, infraestructura, patentes y experiencia acumulada. Respuestas 14/20.

La Figura N°116, muestra que la mayor parte del conocimiento generado en el proyecto destacado ya ha sido difundido, principalmente a través de publicaciones científicas e instancias presenciales de divulgación científica, como congresos o simposios. Sólo dos instituciones indicaron que sus resultados aún no han sido difundidos. Esto sugiere un alto nivel de transferencia de conocimiento hacia la comunidad académica y la industria, aunque persiste un pequeño porcentaje cuyos hallazgos todavía no han sido comunicados formalmente.

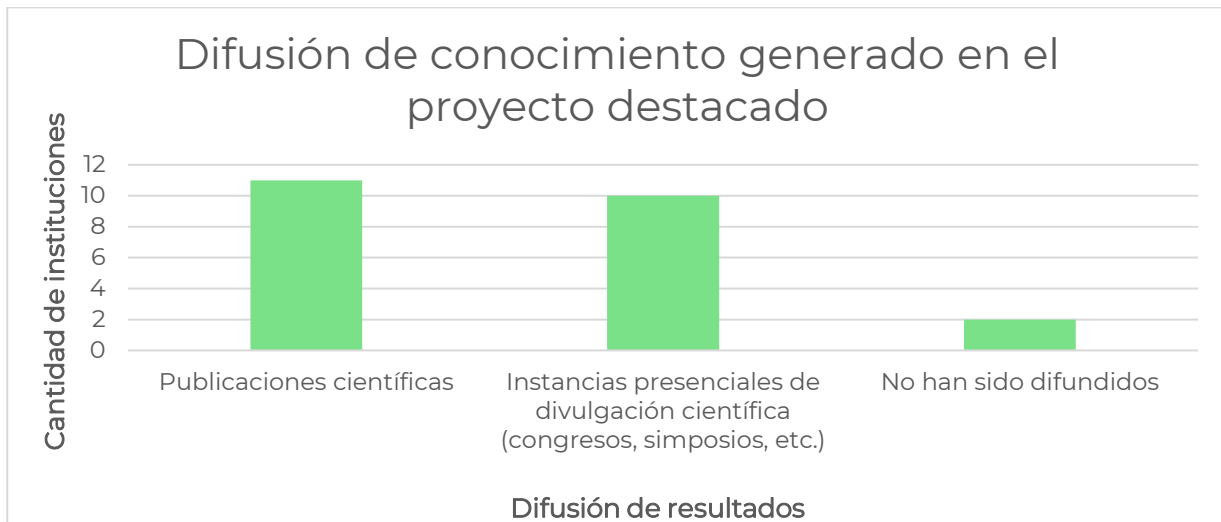


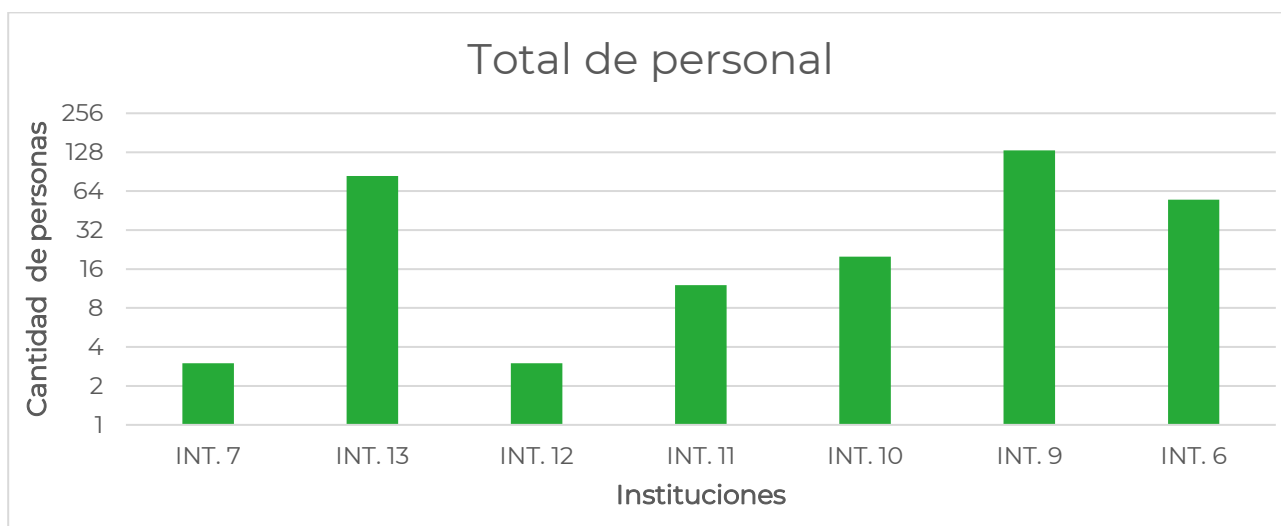
Figura N°116 Métodos de difusión del conocimiento generado en proyectos destacados, mostrando la cantidad de instituciones que publicaron resultados científicos o participaron en eventos de divulgación. Respuestas 14/20.

En conjunto, los proyectos internacionales analizados ilustran con claridad las rutas que Chile aún debe recorrer para consolidar un ecosistema de investigación, desarrollo e innovación en hidrógeno verde que sea robusto, integrado y escalable. Las experiencias generadas por las iniciativas mostradas ponen de relieve la importancia de contar no solo con electrolizadores o laboratorios, sino también con plantas piloto, sistemas de almacenamiento, equipos de uso final y redes de colaboración público-privadas que faciliten la transferencia tecnológica. A la vez, demuestran que solo a través de la coordinación entre generación renovable, formación de personal y protocolos de certificación, es posible avanzar más allá de proyectos aislados hacia pilotos a escala semiindustrial y aplicaciones comerciales. Estos ejemplos inspiradores confirman la necesidad de priorizar las inversiones y políticas públicas que cierren las brechas identificadas, alinear los esfuerzos regionales y asegurar que Chile pueda exportar soluciones competitivas en un mercado global cada vez más exigente en materia de hidrógeno verde.

## 6.2 Personal de las instituciones internacionales

Esta sección se centra en caracterizar al personal que integra las instituciones internacionales que participan en proyectos de hidrógeno verde y sus derivados. A través de entrevistas y encuestas, se recopiló información sobre la cantidad de colaboradores, sus perfiles profesionales, niveles de formación, edades y distribución por género. Estos datos ofrecen una visión de las capacidades humanas con que cuentan dichos organismos para impulsar actividades de investigación, desarrollo, innovación y formación de personal en torno al hidrógeno verde.

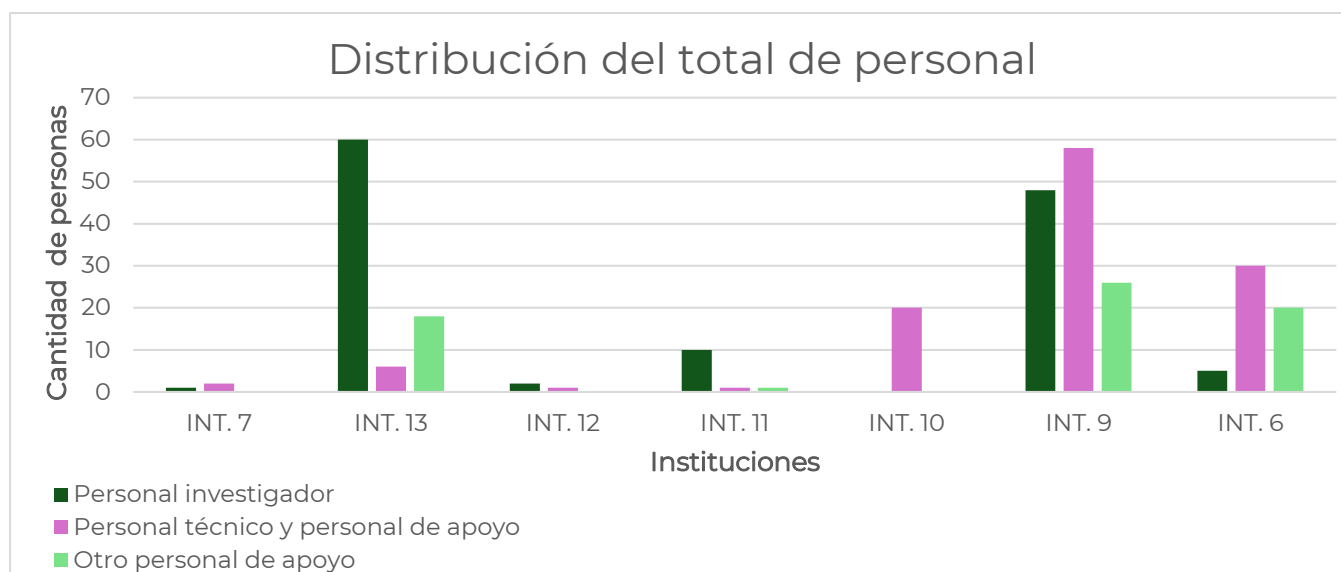
En la *Figura N°117*, se pueden apreciar los contrastes en el tamaño de los equipos, lo que sugiere distintos enfoques institucionales y grados de madurez en sus actividades de hidrógeno verde. Instituciones con grupos reducidos probablemente enfocan sus esfuerzos en líneas de investigación muy específicas o proyectos piloto, lo que facilita la agilidad y especialización, pero limita la capacidad de simultanear múltiples tareas o escalar desarrollos. Por el contrario, aquellos actores con equipos más numerosos disponen de mayor flexibilidad para distribuir roles (investigación, operación de planta, gestión de proyectos, vinculación con la industria) y, por ende, pueden acometer iniciativas de mayor envergadura o multidisciplinarias.



*Figura N°117 Cantidad de personas que realizan actividades relacionadas con hidrógeno verde o derivados. Escala logarítmica base 2. Respuestas 7/20.*

Este desequilibrio en recursos humanos también evidencia la necesidad de articular colaboraciones: centros pequeños podrían aprovechar la experiencia y la infraestructura de organizaciones más grandes, mientras que aquéllas con mayor personal podrían beneficiarse de la agilidad y los enfoques experimentales que ofrecen los equipos más reducidos. En conjunto, la variabilidad en el número de colaboradores refleja tanto las diferentes etapas de desarrollo de cada institución como sus modelos operativos, y subraya la importancia de redes de cooperación que compensen las limitaciones de capacidad en entidades con personal escaso.

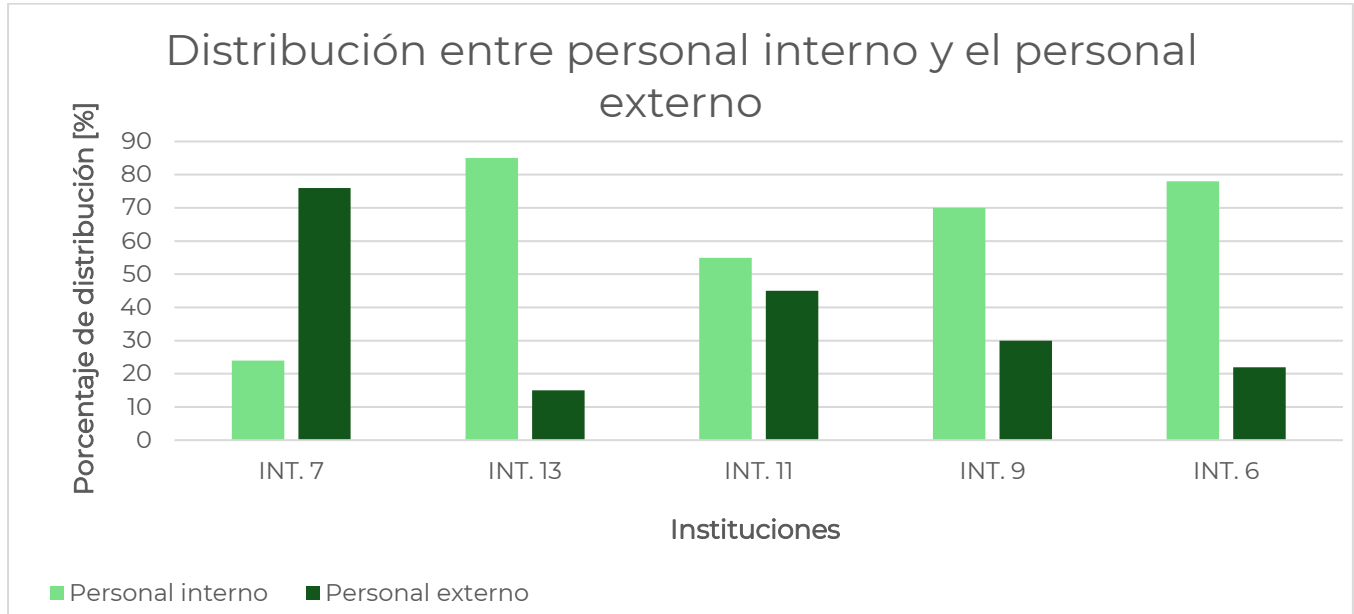
En la *Figura N°118*, se aprecia que las instituciones más grandes presentan un equipo de investigación robusto, acompañado por una fuerza técnica y de apoyo notable, lo que sugiere un enfoque integral entre investigación pura y operación de planta. En cambio, las entidades de menor tamaño se inclinan más hacia un equipo de investigación compacto, con escaso o nulo personal técnico dedicado, indicando que sus proyectos aún no han escalado a fases experimentales o demostrativas de mayor complejidad. Además, en varios casos el “otro personal de apoyo” (administración, finanzas, logística) aparece reducido o ausente, lo que podría sobrecargar a los investigadores y técnicos con tareas secundarias. Estos desequilibrios muestran cómo varían los modelos organizacionales: unas instituciones priorizan la investigación y destinan pocos recursos operativos, mientras que otras equilibran investigación y soporte técnico para sustentar proyectos más maduros. Esto refuerza la necesidad de articular colaboraciones donde las fortalezas puedan complementarse mutuamente, ya sea en capacidad investigadora o en operación técnica.



*Figura N°118 Composición del personal en las instituciones participantes, desglosando investigadores, técnicos y personal de apoyo por cada organización. Respuestas 7/20.*

En la *Figura N°119*, se observa que algunas instituciones confían mayoritariamente en su propio personal interno para desarrollar sus actividades, mientras que otras delegan una proporción considerable en colaboradores externos. Esto puede responder al grado de madurez de los proyectos: quienes cuentan con una base interna sólida probablemente tengan procesos más institucionalizados y menos necesidad de contratar consultores o contratistas puntuales. En cambio, las entidades que dependen de terceros pueden estar aún en fase de arranque o requerir conocimientos muy especializados que no poseen en plantilla. Este patrón sugiere que fortalecer

capacidades internas, ya sea a través de contratación de profesionales permanentes o mediante formación continua, podría reducir la dependencia externa y consolidar equipos más estables en el largo plazo.



*Figura N°119 Proporción entre personal interno y externo contratado por las instituciones para el desarrollo de sus proyectos de investigación. Respuestas 5/20.*

Como se aprecia en la *Figura N°120*, el personal interno presenta una diversidad de formación académica que abarca desde niveles técnicos hasta doctorados, incluyendo también quienes han complementado su formación con diplomados y cursos cortos. Se observa un equilibrio entre quienes cuentan con títulos universitarios o de maestría y aquellos con credenciales más especializadas, lo que refleja un equipo con capacidades variadas tanto en conocimiento práctico como en investigación avanzada. Esta combinación de perfiles sugiere que las instituciones valoran la complementariedad entre formación técnica y académica para abordar los desafíos del hidrógeno verde.

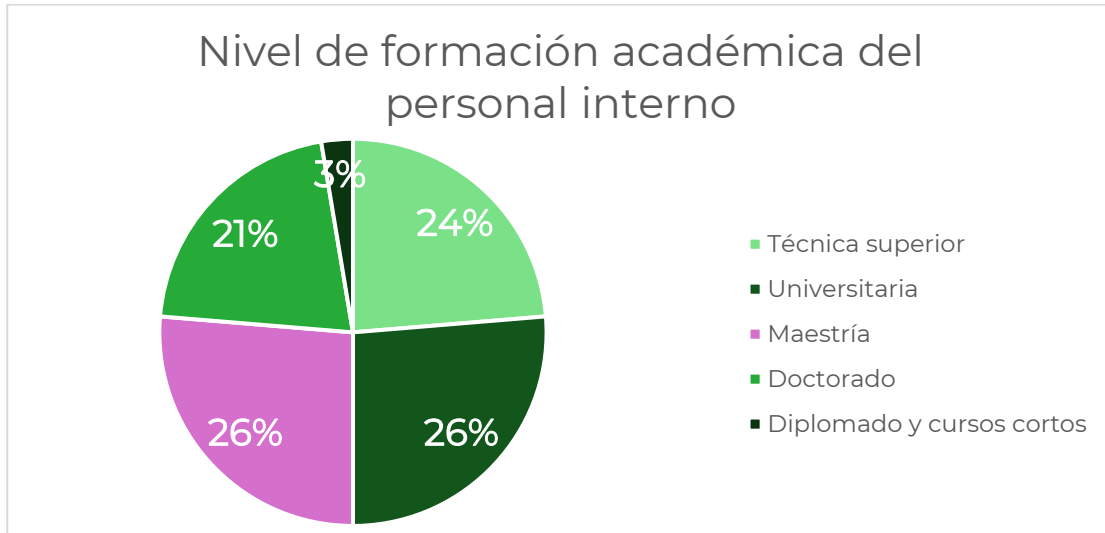


Figura N°120 Nivel de formación académica del personal interno, mostrando la distribución porcentual entre técnicos, universitarios y posgraduados. Respuestas 13/20.

La siguiente *Figura N°121*, presenta la composición de género en las instituciones internacionales muestra, en líneas generales, una marcada predominancia de hombres en la mayoría de los equipos. En algunos casos, la proporción es casi totalmente masculina, mientras que en otros hay una presencia más equilibrada de mujeres, aunque estas siguen siendo minoría. Esta tendencia evidencia un desafío persistente para lograr mayor diversidad de género en el sector del hidrógeno verde, particularmente en roles técnicos y de investigación. La inclusión de más mujeres en distintos niveles y funciones podría aportar perspectivas más variadas y enriquecer la toma de decisiones y la innovación dentro de estos centros.

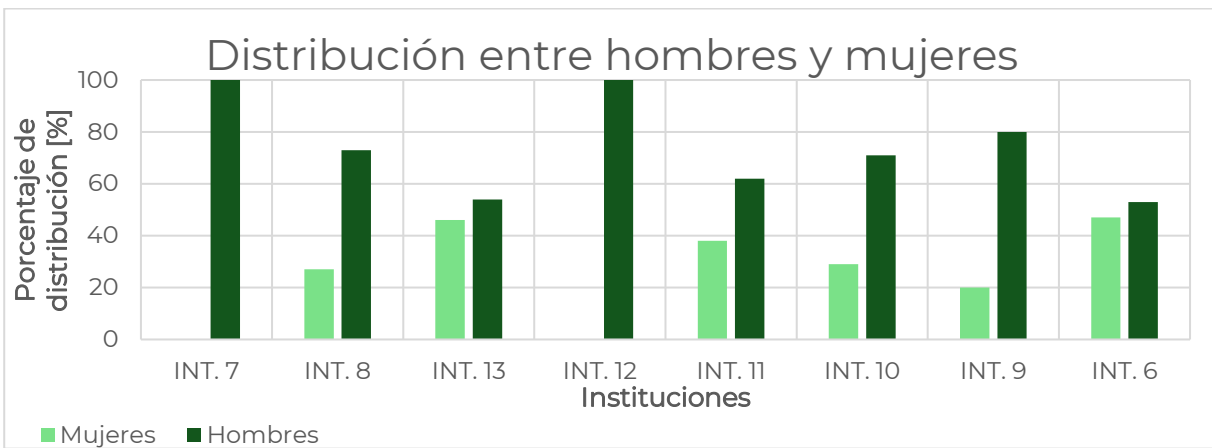


Figura N°121 Distribución de género en el personal investigador de las instituciones participantes, mostrando porcentajes de hombres y mujeres. Respuestas 8/20.

En conjunto, el análisis de la composición y características del personal en estos centros internacionales revela la importancia de contar con equipos multidisciplinarios y diversos para enfrentar los retos del hidrógeno verde. Si bien la distribución por género y los niveles académicos varían, queda claro que la presencia de talento especializado y complementario, tanto interno como externo, es fundamental para el éxito de los proyectos. Estos hallazgos subrayan la necesidad de fomentar una mayor inclusión de mujeres y de equilibrar los perfiles técnicos y académicos en la industria. Asimismo, refuerzan la relevancia de construir equipos fuertes y equilibrados que permitan la transferencia efectiva de conocimiento, la innovación continua y la consolidación de capacidades, de modo que Chile pueda aprender de estas experiencias y avanzar con solidez en el desarrollo de su propio ecosistema de hidrógeno verde.

### 6.2.1.1 Personal del proyecto destacado de las instituciones internacionales

Esta subsección se enfoca en describir el perfil y la composición del personal que participa directamente en el proyecto destacado de cada institución internacional. A través de esta caracterización, se analizan las responsabilidades clave, los niveles de formación y la experiencia de quienes lideran o forman parte activa de la iniciativa, con el fin de comprender mejor cómo se estructura el equipo humano en torno a estas iniciativas emblemáticas de hidrógeno verde.

#### 6.2.1.1.1 Perfil de la dirección del proyecto destacado

En esta sección se presenta el perfil de la dirección del proyecto destacado en cada institución internacional. Se detallan las competencias, trayectoria académica y experiencia profesional de quienes lideran estas iniciativas, con el propósito de comprender cómo su formación y habilidades influyen en la planificación, ejecución y éxito de proyectos emblemáticos de hidrógeno verde.

La *Figura N°122* muestra una clara predominancia de hombres en el rol de investigador principal de los proyectos destacados, con solo una minoría de mujeres liderando estas iniciativas. Esto pone de manifiesto una brecha de género en los puestos de dirección de proyectos de hidrógeno verde a nivel internacional, sugiriendo la necesidad de fortalecer la inclusión femenina en posiciones de liderazgo y tomada de decisiones.

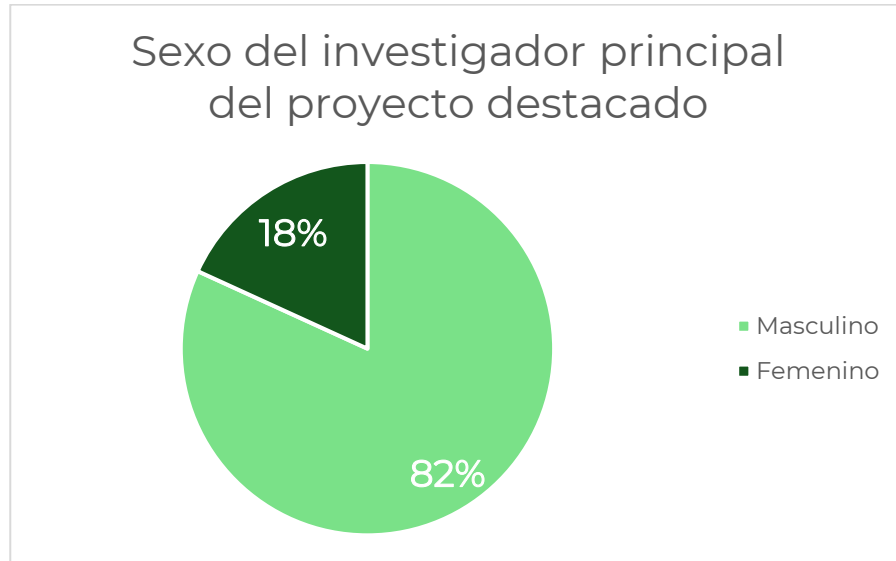


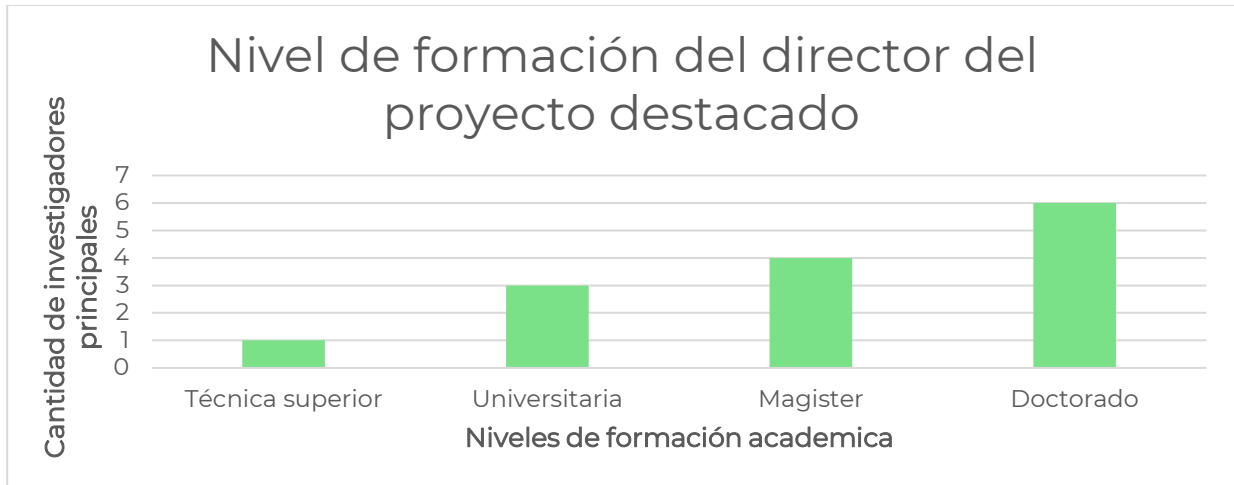
Figura N°122 Porcentaje de investigadores principales del proyecto destacado clasificados por sexo. Respuestas 13/20.

En de la *Figura N°123*, se muestra que los directores de los proyectos destacados muestran perfiles de amplia trayectoria, situándose en edades mayoritariamente en el rango maduro de la carrera profesional, con no menos de 5 años de experiencia. La mayoría se sitúa alrededor de los cuarenta años, con varios líderes superando ligeramente esa cifra. En promedio, la edad de estos directores es de 43 años, lo que refleja un nivel de experiencia consolidado y suficiente madurez para asumir responsabilidades estratégicas en iniciativas de hidrógeno verde.



Figura N°123 Años de experiencia profesional promedio del director del proyecto destacado para cada institución. Respuestas 12/20.

En la *Figura N°124*, se muestra que el perfil académico de los directores de proyecto muestra una mayoría con grados de postgrado, especialmente doctorados y másteres, lo cual es consistente con la naturaleza altamente especializada de los proyectos de hidrógeno verde y características del tipo de trabajo que conlleva la investigación y desarrollo. Sin embargo, destaca el caso de un director que posee formación técnica superior, lo que sugiere que su trayectoria profesional práctica y la experiencia acumulada en el campo pueden ser tan valiosas como los estudios formales de posgrado para liderar iniciativas de I+D+i en un sector tan específico como el hidrógeno verde y sus derivados.



*Figura N°124 Cantidad de directores del proyecto destacado clasificados por su nivel de formación académica. Respuestas 14/20.*

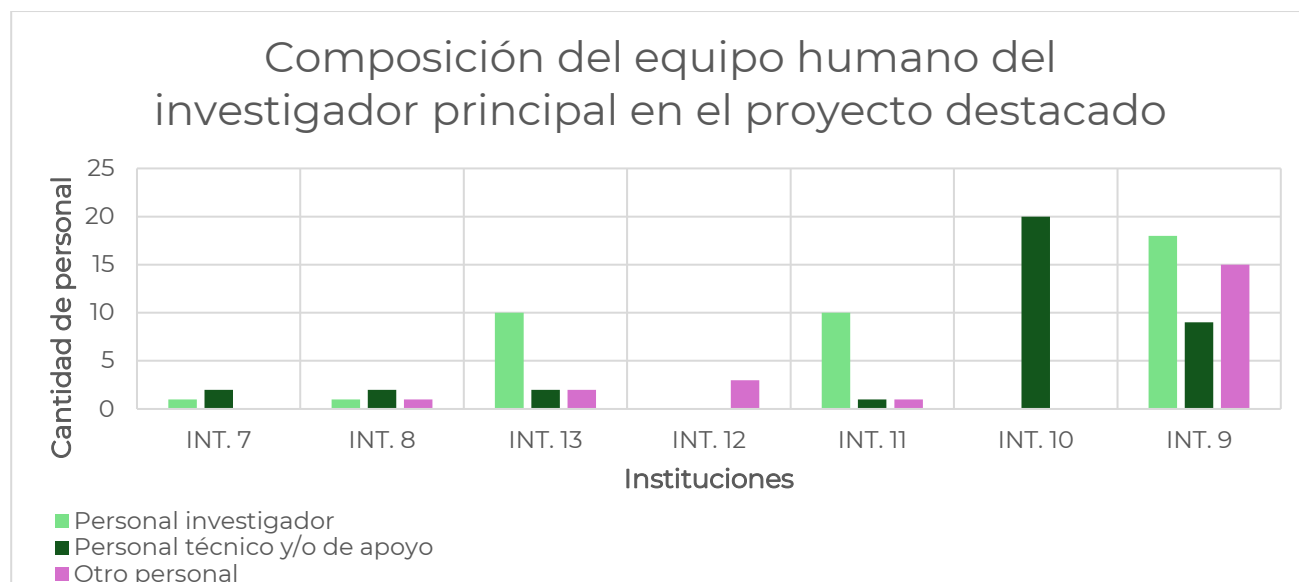
En conjunto, el perfil de la dirección de los proyectos destacados refleja un equilibrio entre experiencia técnica y formación académica avanzada, lo cual ha permitido combinar rigurosidad investigativa con enfoque práctico en cada iniciativa. Si bien predominan los directores con estudios de posgrado, la presencia de un profesional con formación técnica superior demuestra la importancia de contar con líderes versátiles que puedan integrar conocimientos operativos y de campo en el desarrollo de soluciones innovadoras. Este recorrido por el nivel de estudios y la trayectoria de los directores pone de relieve la necesidad de fomentar tanto la formación de alto nivel como la incorporación de perfiles técnicos, de modo de fortalecer la gobernanza y la implementación efectiva de proyectos en el ecosistema internacional de hidrógeno verde.

### 6.2.1.1.2 Perfil del personal del proyecto destacado de centros I+D+i

Este apartado presenta las características del equipo humano que integra el proyecto destacado en centros de I+D+i internacionales, detallando la proporción de personal interno y externo, sus niveles de formación y la composición de género. Con ello, se pretende mostrar cómo se distribuyen los distintos perfiles y competencias necesarias para impulsar la investigación e innovación en hidrógeno verde.

La *Figura N°125*, muestra que en la mayoría de los proyectos el investigador principal cuenta con un núcleo de investigadores clave, pero también recurre a un apoyo técnico significativo cuando se trata

de iniciativas de mayor escala. En algunos casos, la proporción de personal investigador es predominante, mientras que, en otros, especialmente en proyectos con un enfoque más operativo, se observa un incremento notable en la participación de técnicos y personal de apoyo. Además, ciertos equipos incorporan otro tipo de colaboradores, lo que evidencia la necesidad de complementar el trabajo científico con tareas auxiliares para asegurar el avance efectivo del proyecto. De este modo, la distribución del equipo revela la diversidad de perfiles requeridos para abordar tanto la investigación teórica como las labores prácticas y de gestión asociadas a cada proyecto destacado.



*Figura N°125 Composición del equipo humano en proyectos destacados: investigadores, técnicos y personal de apoyo. Respuestas 7/20.*

En síntesis, la composición del equipo de cada investigador principal refleja la complementariedad entre la labor científica y las tareas de ejecución práctica. Mientras que algunos proyectos se sostienen principalmente en un grupo reducido de investigadores, otros, especialmente aquellos con alcance demostrativo o piloto, incorporan una mayor cantidad de técnicos y personal de apoyo. Las diferencias en la distribución del equipo ponen de manifiesto que el éxito de los proyectos de hidrógeno verde depende no solo del conocimiento especializado, sino también de la capacidad de integrar esfuerzos multidisciplinares que garanticen su implementación efectiva.

### 6.3 Infraestructura, equipamiento y recursos de las instituciones internacionales

En esta sección se describe y analiza la infraestructura, el equipamiento y los recursos disponibles en las instituciones internacionales, a fin de ofrecer un marco comparativo con las capacidades nacionales. A partir de la información recopilada, incluyendo visitas a terreno, entrevistas con personal clave y cuestionarios detallados, se identifican los principales activos tecnológicos, laboratorios, bancos de prueba y capacidades logísticas que sustentan proyectos de hidrógeno verde en distintas

regiones del mundo. Además, se evalúa cómo estas instituciones han organizado sus recursos humanos y materiales para abordar los desafíos de investigación, desarrollo e innovación, aportando lecciones que pueden orientar la consolidación de un ecosistema nacional más robusto y competitivo.

### 6.3.1 Infraestructura de las instituciones internacionales

En este apartado se presenta una visión comparativa de la magnitud de las instalaciones físicas que disponen las instituciones internacionales participantes en el estudio. La Tabla N°33, recoge un indicador de “escala de infraestructura” para cada entidad, expresado de manera homogénea para facilitar la comparación entre ellas.

Al analizar las cifras, se aprecia que algunas organizaciones cuentan con espacios relativamente reducidos, propios de laboratorios o instalaciones de trabajo de menor tamaño, mientras que otras disponen de superficies mucho más amplias, características de centros de demostración o instalaciones de producción a gran escala. Esta disparidad refleja distintos roles dentro del ecosistema global: los centros con infraestructuras modestas suelen estar orientados a actividades de investigación de laboratorio y pruebas piloto de pequeña envergadura, mientras que aquellos con áreas mucho mayores aluden a operaciones industriales o plantas integrales donde se realiza investigación, desarrollo y demostración simultáneamente.

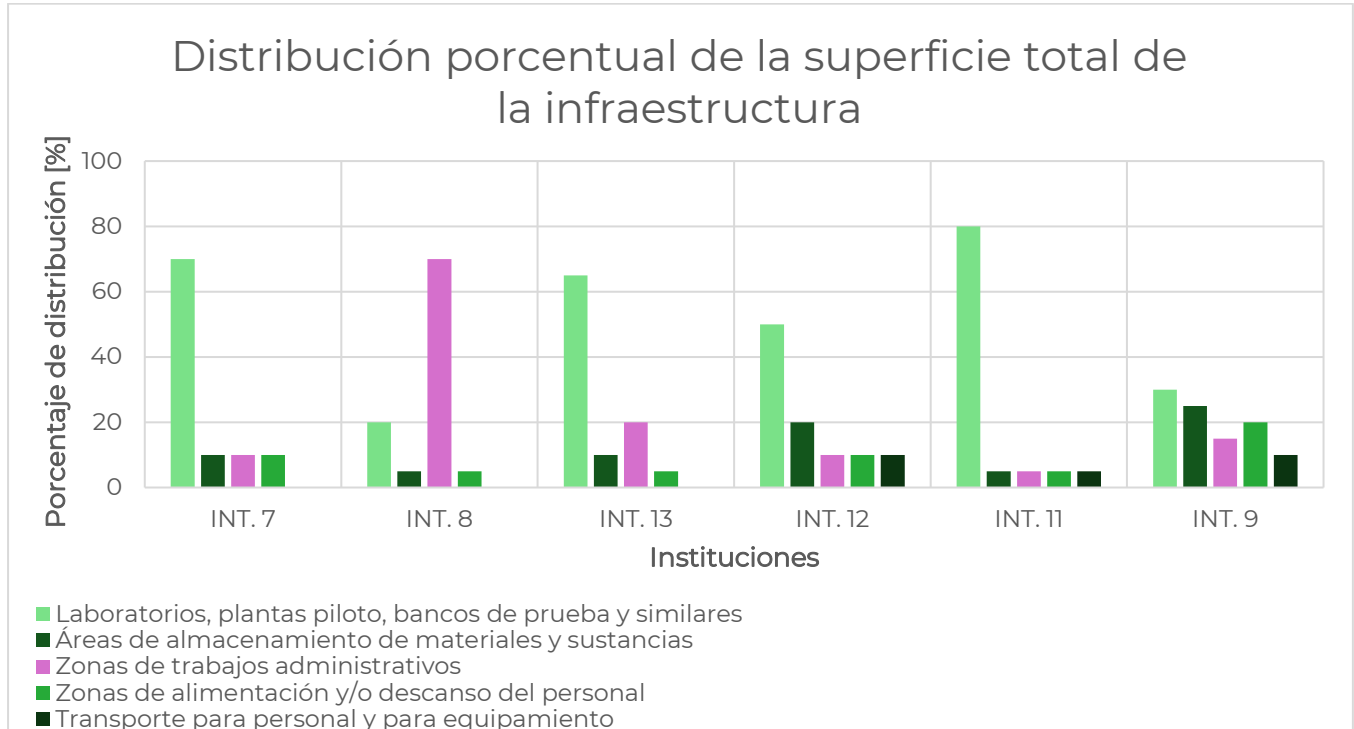
Estas diferencias en la extensión y complejidad de los espacios físicos inciden directamente en la capacidad de cada institución para acoger equipos de gran tamaño, sostener operaciones continuas y formar equipos multidisciplinarios en ambientes reales. En consecuencia, el contraste de esta información con la situación nacional aporta antecedentes clave: tanto para dimensionar adecuadamente instalaciones futuras en Chile como para identificar posibles modelos de colaboración con cada tipo de infraestructura internacional.

*Tabla N°33 Muestra la superficie total de infraestructura con la que cuentan las instituciones internacionales. Respuestas 6/21.*

Institución	Superficie total de infraestructura en [m <sup>2</sup> ]
INT-7	1000
INT-8	1000
INT-13	12,5
INT-12	100
INT-11	500
INT-9	42300

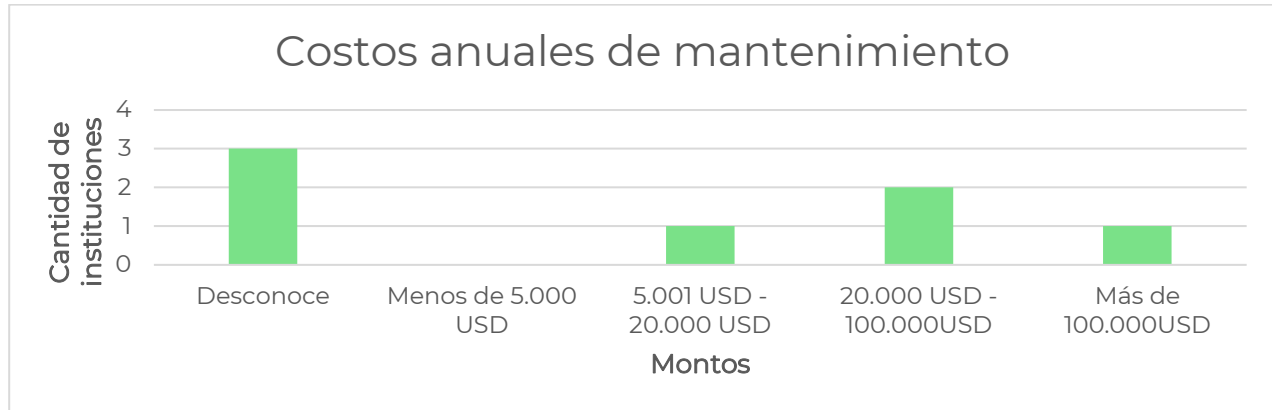
La *Figura N°126*, reafirma que los laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba ocupan la mayor parte del espacio en cada institución, evidenciando un claro enfoque en actividades experimentales. Las áreas de almacenamiento, administrativas, de descanso y de circulación representan solo una pequeña fracción de la superficie, lo que indica que el grueso de la infraestructura se destina a investigación y validación tecnológica. En comparación con la realidad nacional, donde se señalan carencias de espacios de ensayo, estos centros internacionales cuentan con una distribución que privilegia la capacidad operativa y de pruebas. Esto subraya la necesidad, en el contexto local, de

destinar recursos no solo a la adquisición de equipos, sino también a adecuar o expandir instalaciones para que los laboratorios puedan operar con la escala y el confort que requieren las investigaciones de hidrógeno verde y sus derivados.



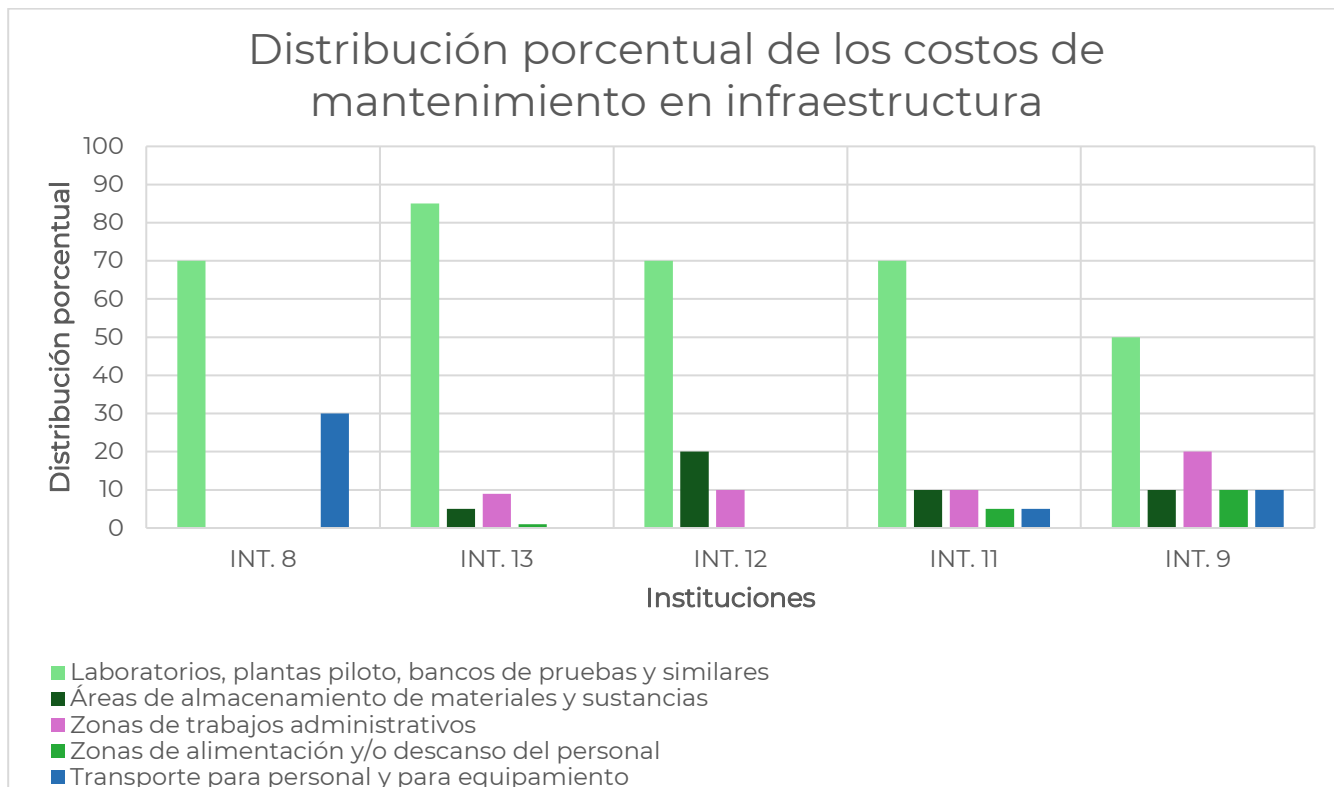
*Figura N°126 Distribución porcentual de la superficie total por áreas funcionales en instituciones de investigación. Respuestas 6/20.*

Dentro de la *Figura N°127*, la mayoría de las instituciones internacionales no registra o desconoce sus costos anuales de mantenimiento, lo que sugiere que el seguimiento presupuestario de esta partida no es sistemático en varios casos. Sin embargo, entre quienes sí informan cifras, se observa una inversión significativa, algunas destinan presupuestos medios y altos para mantener sus instalaciones, lo que refleja la importancia que atribuyen al cuidado de sus plantas piloto y laboratorios. Este contraste entre desconocimiento y asignaciones elevadas resalta la necesidad, a nivel nacional, de establecer prácticas claras de registro y planificación de costos de mantenimiento para asegurar la operatividad y prolongar la vida útil de los equipos de hidrógeno verde.



*Figura N°127 Costos anuales de mantenimiento de infraestructura, clasificados en rangos de hasta 100,000 USD. Respuestas 7/20.*

En todos los casos analizados dentro de los gráficos de la *Figura N°128*, la mayor parte de los recursos de mantenimiento se concentra en las áreas experimentales: laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba absorben claramente la mayor proporción del presupuesto destinado a asegurar la operatividad de la infraestructura. En contraste, los espacios administrativos y las áreas de alimentación/descanso reciben una asignación mucho menor, mientras que el mantenimiento de zonas de almacenamiento y transporte también queda relegado a porcentajes reducidos en la mayoría de las instituciones. Esto refleja que, en un entorno internacional, los esfuerzos por mantener la continuidad de las actividades de I+D+i priorizan claramente los equipamientos directamente vinculados a la generación y validación de conocimiento, dejando en un segundo plano los gastos asociados a soporte logístico o de servicios generales.



*Figura N°128 Distribución porcentual de costos de mantenimiento por tipo de área e institución. Respuestas 5/20.*

La prevalencia de inversiones de mantenimiento en laboratorios y plantas piloto subraya la importancia de conservar plenamente operativas las instalaciones de investigación y demostración. Para las instituciones que aspiran a desarrollar o replicar este modelo en Chile, resulta esencial destinar recursos suficientes al cuidado de los equipos experimentales, pues cualquier interrupción en su funcionamiento repercute directamente en la capacidad de generar datos, avanzar en proyectos y formar capital humano especializado. A su vez, no debe descuidarse la planificación de mantenimiento de áreas de soporte como almacenamiento, transporte y espacios administrativos, ya que un fallo en estos servicios complementarios puede también limitar la continuidad de las actividades centrales.

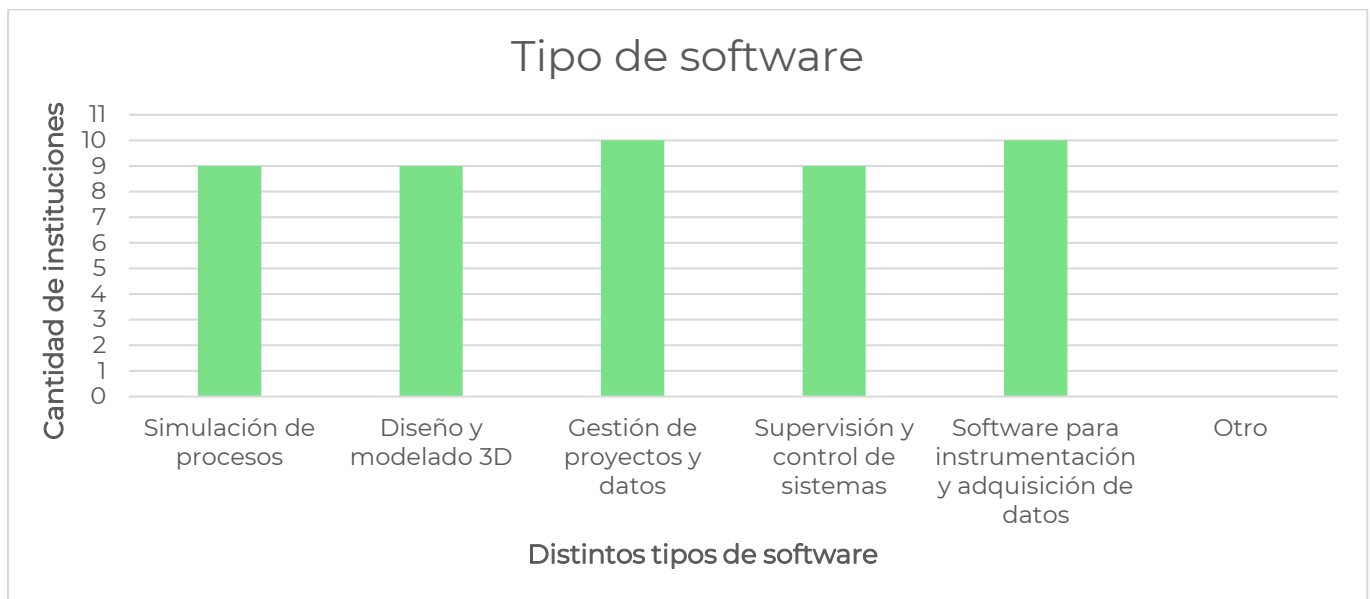
### 6.3.2 Equipamiento de las instituciones internacionales

Esta sección describe de manera general el equipamiento disponible en las instituciones internacionales analizadas, con el fin de comprender las capacidades tecnológicas y los recursos con que cuentan para proyectos de hidrógeno verde y sus derivados. A través de este levantamiento, se identifican tanto los equipos clave para investigación y demostración, como los instrumentos de apoyo. Al contrastar esta información con las carencias detectadas en el ámbito nacional, se busca visibilizar buenas prácticas, niveles de sofisticación tecnológica y escalas de operación que sirvan de referencia para orientar la planificación de inversiones y el fortalecimiento de la matriz de equipamiento en Chile.

### 6.3.2.1 Equipamiento digital de los centros I+D+i

Esta subsección describe las herramientas digitales empleadas por las instituciones internacionales para respaldar sus actividades en hidrógeno verde, derivadas y tecnologías asociadas. Se examinan los tipos de software, así como la inversión y prioridad asignadas a estas plataformas. El análisis busca identificar cómo las instituciones han integrado soluciones digitales avanzadas para optimizar el modelado de procesos, el diseño de plantas, el monitoreo de ensayos piloto y el manejo de información, contrastando estas prácticas con la realidad nacional y resaltando brechas y oportunidades para fortalecer el ecosistema en estas áreas en Chile.

Dentro de la *Figura N°129*, se muestra que casi todas las instituciones cuentan con herramientas digitales robustas para diferentes etapas del ciclo de I+D+i: desde la simulación de procesos hasta el monitoreo en tiempo real de plantas piloto. El uso extendido de software de gestión de proyectos y análisis de datos indica que gran parte del trabajo se apoya en plataformas que facilitan la planificación y el seguimiento de ensayos. Asimismo, la adopción de soluciones para diseño en 3D y supervisión de sistemas revela un enfoque fuerte en la optimización de instalaciones y el control de condiciones operativas.



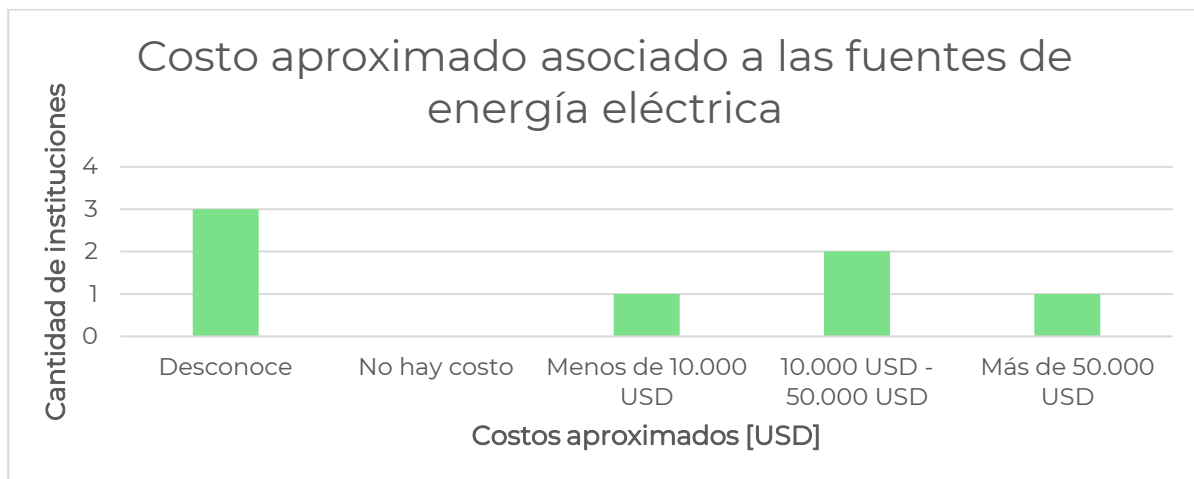
*Figura N°129 Tipos de software especializado empleados por las instituciones para investigación en hidrógeno, categorizados por su función específica. (Se admite más de una respuesta). Respuestas 10/20.*

En conjunto, esta diversidad de aplicaciones digitales demuestra cómo los centros internacionales han integrado el software como un componente clave de su estrategia de investigación. Para el contexto nacional, resulta evidente que fortalecer la adopción de herramientas similares podría acelerar el avance técnico y permitir un alineamiento más estrecho con estándares globales. Por ello, incorporar estas plataformas en los laboratorios chilenos, acompañado de capacitación específica, se perfila como una oportunidad fundamental para cerrar brechas y potenciar la competitividad en la cadena de valor del hidrógeno verde.

### 6.3.2.2 Disponibilidad de energía eléctrica de los centros I+D+i

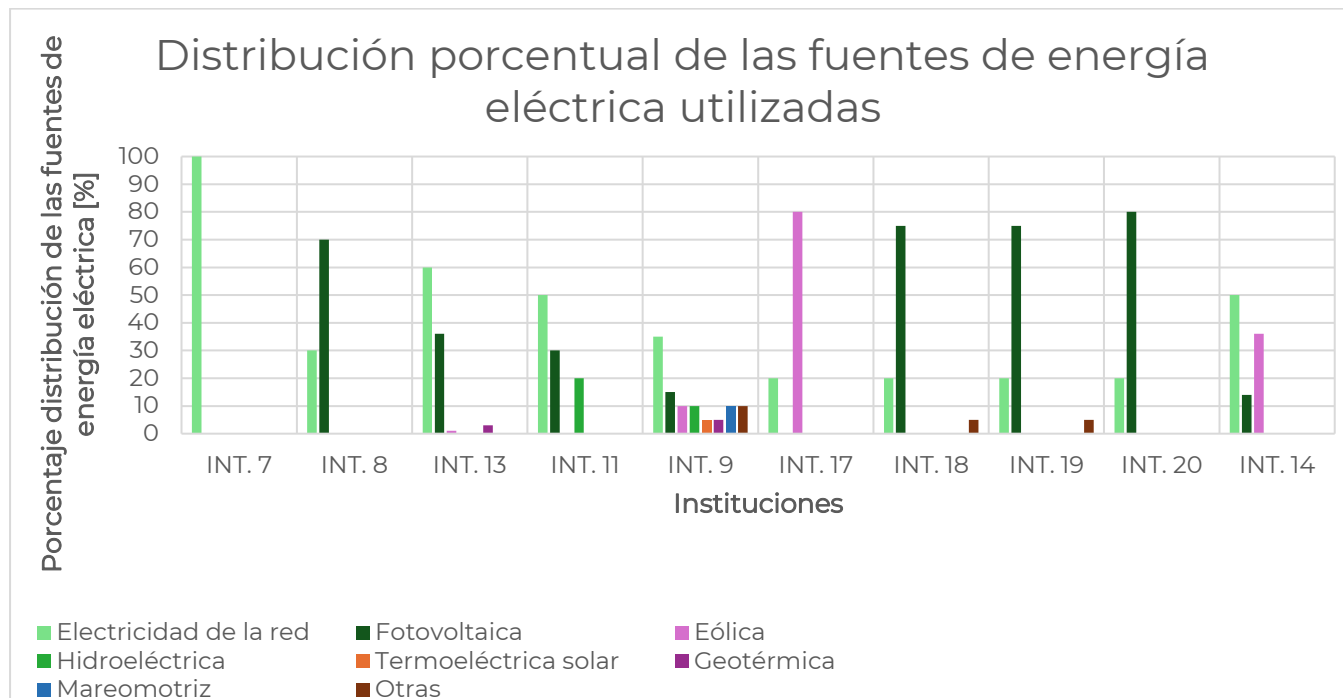
En esta sección se analiza cómo aseguran los centros internacionales el suministro eléctrico necesario para sus actividades en torno al hidrógeno verde y derivados. Además de la potencia contratada y la confiabilidad de la red, se consideran los porcentajes de uso de fuentes frente a la energía de la red. Comprender el balance energético permite evaluar hasta qué punto estas instituciones aprovechan recursos sostenibles y cómo enfrentan los desafíos de intermitencia o costos, información clave para identificar buenas prácticas que puedan replicarse en el contexto nacional.

La *Figura N°130*, muestra que en varios casos los centros no conocen o no informan el costo eléctrico asociado a sus fuentes de energía. Un grupo reducido de instituciones reporta costos moderados en el rango intermedio, y solo unas pocas declaran cifras más elevadas. Esta heterogeneidad refleja niveles distintos de transparencia y seguimiento de gastos energéticos, así como posibles variaciones en tarifas regionales o contratos. Durante la fase de levantamiento, esta falta de datos claros fue recurrente y sugiere la necesidad de mejorar mecanismos de monitoreo y registro de los costos de energía, especialmente cuando se busca incorporar mayores proporciones de renovables o evaluar la viabilidad económica de proyectos de hidrógeno a escala piloto e industrial.



*Figura N°130 Costos asociados a las fuentes de energía eléctrica en las instituciones, desde opciones sin costo hasta más de 50,000 USD. Respuestas 7/20.*

La *Figura N°131*, muestra que, aunque la mayoría de las instituciones sigue dependiendo en gran medida de la red eléctrica, varias incorporan porcentajes significativos de energías limpias adicionales. Destaca cómo algunas entidades combinan varias fuentes renovables para diversificar su abastecimiento. También se observa la presencia puntual de hidráulica y geotérmica, así como casos aislados de mareomotriz. En suma, este panorama evidencia un interés creciente por integrar diversas renovables, más allá de la simple conexión a red, para apoyar proyectos de hidrógeno y reducir la huella de carbono en las operaciones de I+D+i, considerando que estos son proyectos de hidrógeno verde o renovable.



*Figura N°131 Distribución porcentual de fuentes de energía utilizadas en las instituciones, incluyendo red eléctrica, fotovoltaica y otras renovables. Respuestas 10/20.*

Al observar la *Figura N°132*, se aprecia que nivel promedio, aunque la red eléctrica sigue siendo la principal fuente de suministro, las energías renovables como la fotovoltaica y la eólica ya representan una porción muy relevante en la matriz de los centros. En conjunto, ambas abarcan más de la mitad de la energía consumida para investigación y operación, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. En cambio, fuentes como la hidroeléctrica, la termoeléctrica solar o la geotérmica aportan cantidades muy marginales en promedio, lo que sugiere que estas fuentes energéticas se están utilizando para investigación y desarrollo por su propia cuenta, y que su aporte en el I+D+i de hidrógeno y derivados es un efecto colateral más que una fuente primaria. En síntesis, este balance promedio confirma el movimiento hacia un suministro más limpio y descentralizado, pero también pone de manifiesto oportunidades para integraciones adicionales de renovables menos comunes.

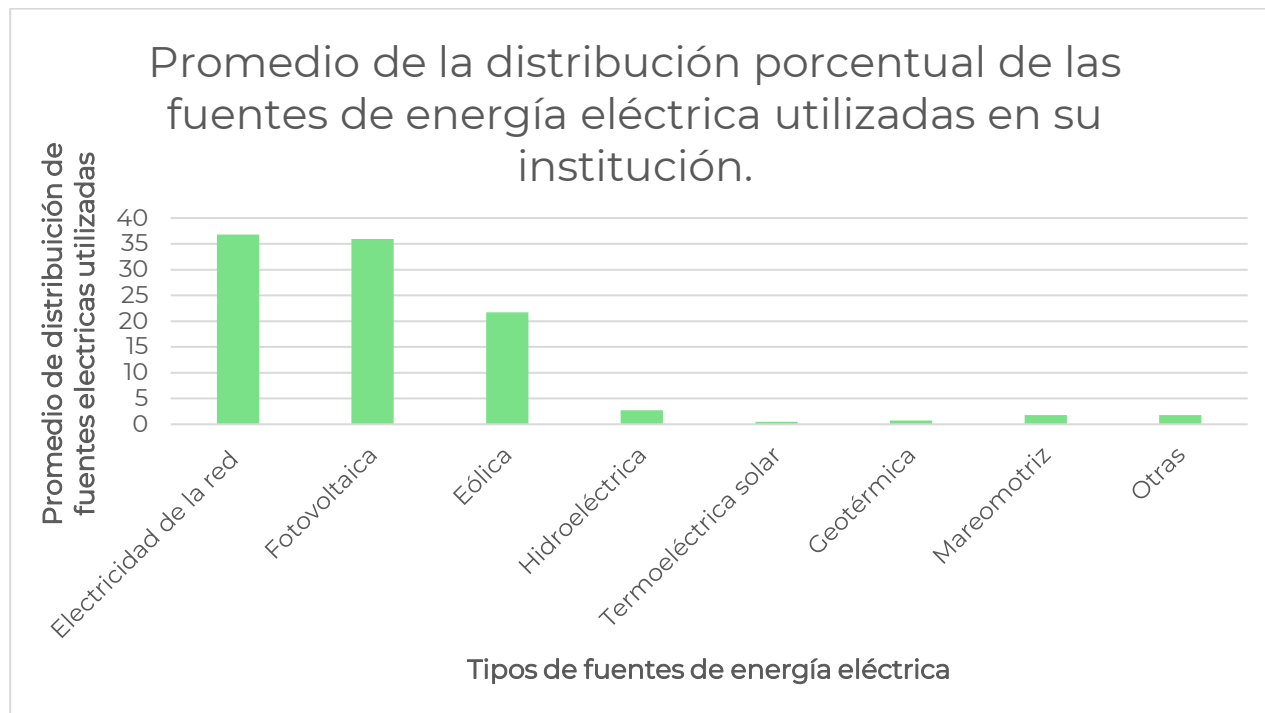


Figura N°132 Distribución porcentual de fuentes de energía en instituciones, mostrando predominio de red eléctrica sobre renovables. Respuestas 11/20.

### 6.3.2.3 Equipamiento para la producción de hidrógeno verde de los centros I+D+i

En esta sección se presenta una descripción general del equipamiento específico que utilizan los centros de investigación y desarrollo internacionales para generar hidrógeno verde. Se revisan los distintos tipos de electrolizadores instalados, sus capacidades, con el fin de ofrecer un panorama comparativo que sirva de referencia para el diseño y priorización de equipos en el contexto chileno de I+D+i y formación de personal de hidrógeno verde.

A nivel internacional, como se puede observar en la *Figura N°133*, casi dos tercios de las instituciones cuentan con equipamiento para la producción de hidrógeno verde, mientras que alrededor de un tercio aún no dispone de esta capacidad. En contraste, en Chile apenas la mitad de los centros de I+D+i informan tener electrolizadores operativos, lo que refleja una menor penetración de esta tecnología en comparación con el contexto global. Esta brecha sugiere que, aunque Chile ha avanzado, aún existe un camino por recorrer para equipar a sus laboratorios con las herramientas básicas de producción del hidrógeno verde al nivel que se observa en instituciones referentes del exterior.

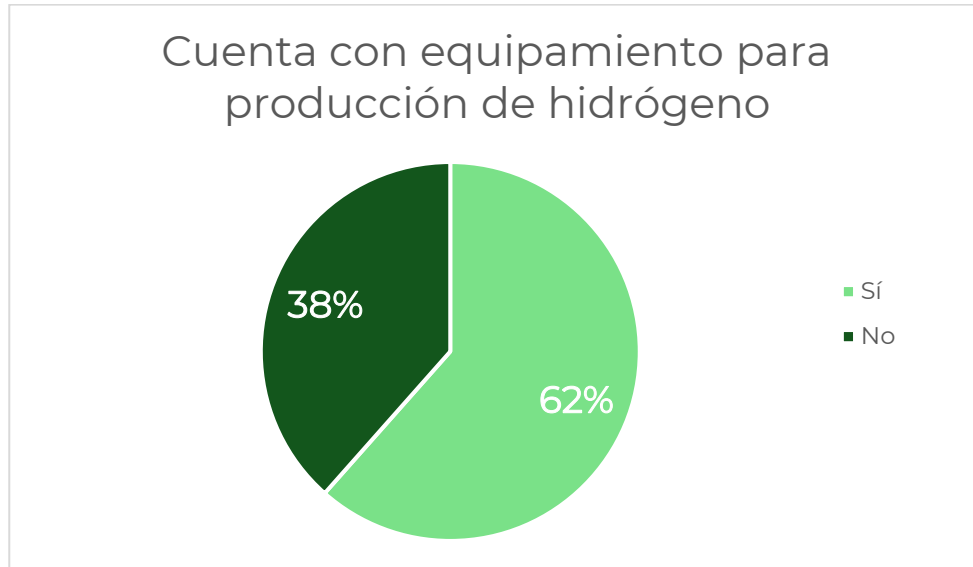


Figura N°133 Cuenta con equipamiento para la producción. Respuestas 14/20.

En la *Figura N°134* muestra que, en el ámbito internacional, el electrolizador de tipo PEM destaca como la tecnología predominante, evidenciando un claro énfasis en esta plataforma para la producción de hidrógeno verde. Le siguen de cerca los modelos de electrolizadores alcalinos, mientras que las tecnologías emergentes de membrana de intercambio aniónico (AEM) y de óxido sólido (SOEC) también están presentes, aunque en menor medida. Por su parte, en Chile la adopción de electrolizadores PEM también es la más amplia, aunque con una implantación más limitada que en el extranjero; la opción alcalina cuenta con cierta presencia, mientras que las AEM aparecen de manera menos frecuente y no se registran instalaciones de SOEC. En conjunto, esto sugiere que, si bien Chile se alinea con la tendencia global en priorizar los sistemas PEM, aún debe fortalecer la incorporación de tecnologías complementarias para cerrar la brecha con los referentes internacionales.

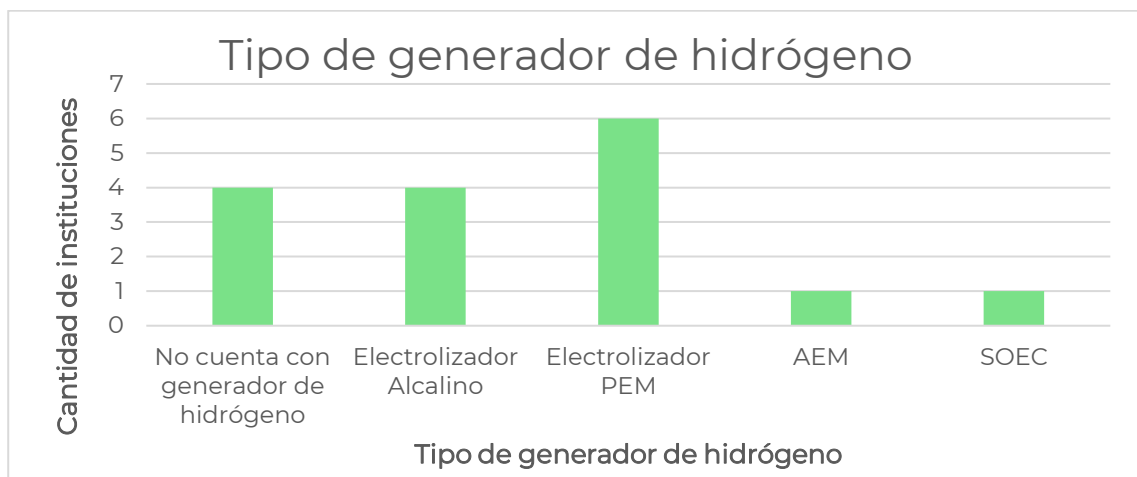
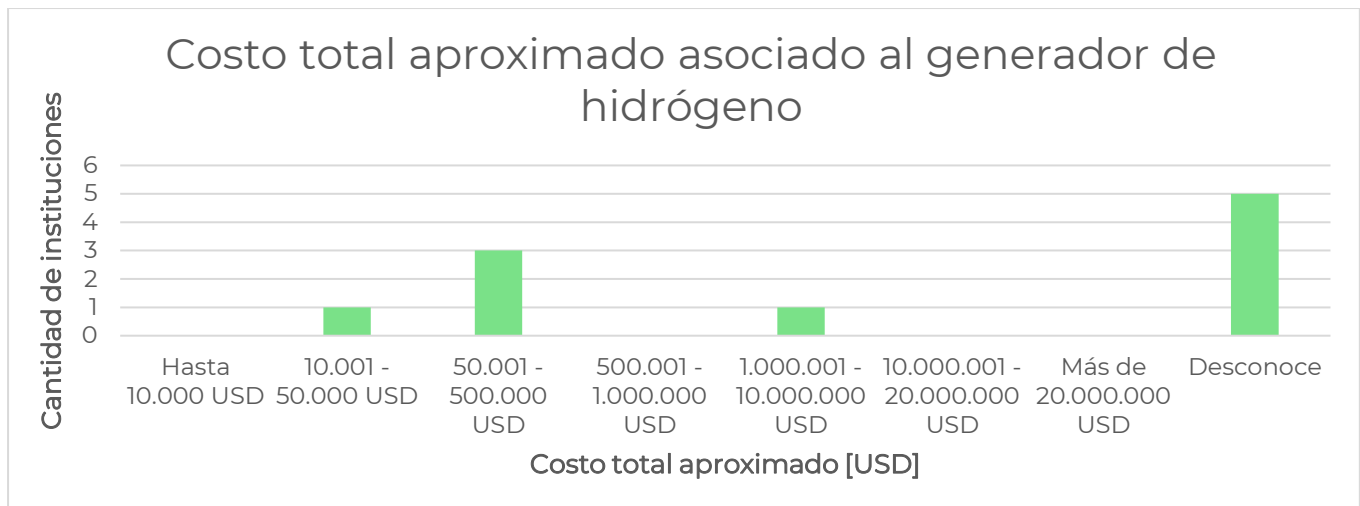


Figura N°134 Tipos de generadores. Respuestas 14/20.

La información presentada en la *Figura N°135*, sugiere que los costos asociados a la adquisición de generadores de hidrógeno en los centros internacionales abarcan desde rangos moderados, pero no inferiores a los 10.000 USD, hasta valores elevados, como 1.000.000 USD, y por otro lado hay un número significativo de instituciones que no especifican el monto. Esto refleja tanto la diversidad de escalas de proyecto como la incertidumbre o la flexibilidad presupuestaria que existe en distintos contextos. Mientras algunas instituciones optan por soluciones relativamente accesibles, otras invierten en equipos de mayor envergadura, y en varios casos no se declara el valor preciso, lo que dificulta establecer un punto de referencia único para comparaciones. En conjunto, estos datos muestran que las inversiones en tecnología de generación de hidrógeno pueden ajustarse a distintos niveles de presupuesto y objetivos, aunque la falta de información en ciertos casos también indica la necesidad de mayor transparencia para orientar futuras decisiones de compra.

En las entrevistas con actores clave se recalcó que, de todos los componentes, el electrolizador suele figurar como el equipo más costoso, por lo que reducir su precio es indispensable para masificar la adopción del hidrógeno verde.



*Figura N°135 Distribución de costos de generadores de hidrógeno en instituciones, clasificados en rangos desde 10.000 USD hasta más de 200.000 USD, junto con el país de origen de los equipos. Respuestas 10/20.*

El panorama internacional *Figura N°136*, muestra una mayor heterogeneidad y escala en las capacidades de generación de hidrógeno en comparación con lo observado en Chile. Mientras que en Chile la mayoría de los electrolizadores instalados en centros de I+D+i se concentran en rangos bajos, menores a 5 Nm<sup>3</sup>/h, entre las instituciones internacionales se observa un número significativo que dispone de sistemas con capacidad de generación muy superior, por encima de 100 Nm<sup>3</sup>/h. Asimismo, el grupo de instituciones foráneas incluye varias con capacidades intermedias de 5-10 Nm<sup>3</sup>/h y 11-100 Nm<sup>3</sup>/h, algo prácticamente inexistente en el contexto chileno.

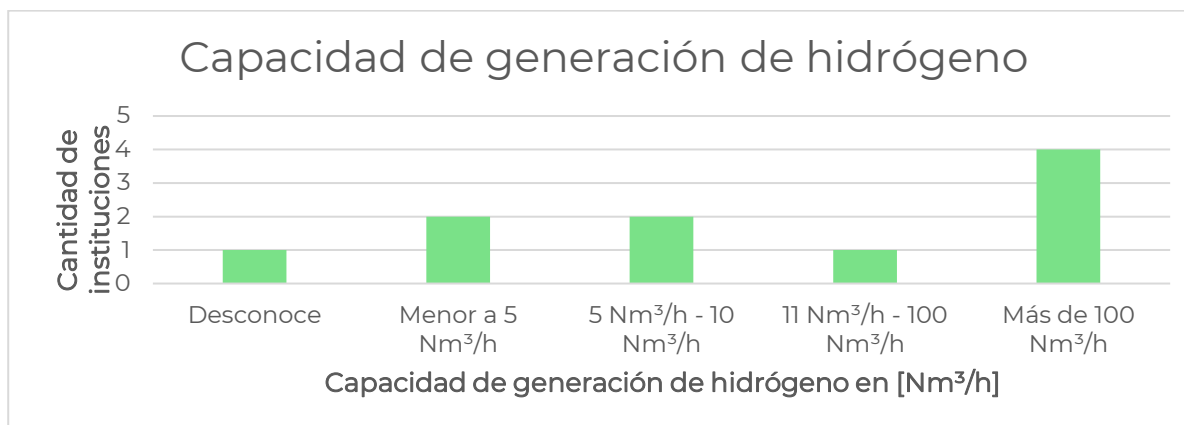


Figura N°136 Capacidad de producción de hidrógeno en Nm³/h reportada por las instituciones, desde menos de 5 Nm³/h hasta más de 100 Nm³/h. Respuestas 10/20.

Esta diferencia evidencia que, si bien en Chile ya existen experiencias piloto y de laboratorio, éstas se limitan a flujos reducidos de producción, adecuados para investigación de pequeña escala. En contraste, muchos centros internacionales utilizan electrolizadores diseñados para producir hidrógeno a ritmo industrial o precomercial, lo que les permite validar procesos y optimizar el rendimiento en condiciones más cercanas a aplicaciones reales.

Para cerrar la brecha, los centros chilenos deben avanzar de las configuraciones de laboratorio hacia sistemas de mayor capacidad, de modo que puedan simular mejor las condiciones de operación real y generar conocimiento relevante para escalabilidad y despliegue comercial de hidrógeno verde.

### 6.3.2.3.1 Equipos periféricos para generación de hidrógeno verde

Los equipos periféricos son fundamentales para solventar desafíos propios de la electrólisis a partir de fuentes renovables, como la intermitencia en el suministro eléctrico o la necesidad de controlar la temperatura de operación, y permiten escalar los ensayos de laboratorio hacia condiciones más cercanas a la práctica industrial. A continuación, dentro de la *Tabla N°34* se describen los principales periféricos identificados en los centros internacionales visitados, cuya presencia contrasta con la mayoría de las instalaciones chilenas, donde aún predominan configuraciones experimentales que carecen de este nivel de respaldo.

Tabla N°34 Equipos periféricos para generación de hidrógeno verde. Respuestas 4/10.

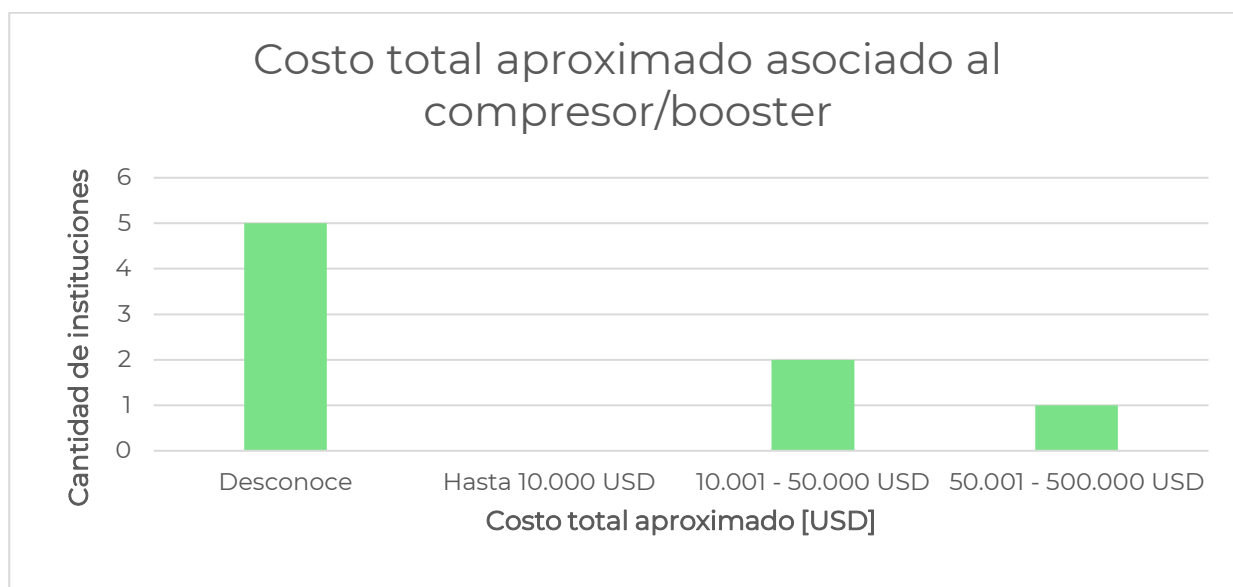
Tipo de equipo	Cantidad
Secador de hidrógeno	1
Sistema de almacenamiento de baterías	1
Refrigeración para el electrolizador	2

Tanto en Chile como en las instituciones internacionales encuestadas, se observó una limitada disponibilidad de información específica sobre equipos periféricos asociados a la producción de hidrógeno, como secadores, sistemas de almacenamiento de baterías y unidades de refrigeración. No obstante, a partir de las entrevistas realizadas, las visitas a terreno y la revisión técnica de los propios equipos de electrólisis, se constató que estos componentes son fundamentales para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los sistemas, siendo en muchos casos exigidos por los propios fabricantes. En consecuencia, se recomienda desarrollar un registro sistemático que permita identificar y vincular los equipos periféricos presentes en cada instalación de generación de hidrógeno.

#### 6.3.2.4 Equipamiento para el acondicionamiento de hidrógeno verde de los centros I+D+i

La etapa de acondicionamiento del hidrógeno verde es clave para su almacenamiento, transporte y uso final en condiciones seguras y eficientes. Esta etapa involucra procesos como la compresión, ajuste de temperatura y purificación del gas, y requiere de equipamiento especializado que permita cumplir con estándares técnicos exigidos por la industria. El 57% de las instituciones participantes indicó contar con un compresor o booster, sin embargo, durante el levantamiento de información realizado con instituciones internacionales, se detectó escasa información sistematizada sobre sus características y costos.

En la *Figura N°137*, se presenta una aproximación a los costos totales asociados al equipamiento de compresión o booster, según la información proporcionada por las instituciones. Este análisis permite ilustrar la variabilidad de rangos y pone de manifiesto la necesidad de contar con criterios claros para orientar futuras inversiones en este tipo de equipamiento dentro de los centros de I+D+i.



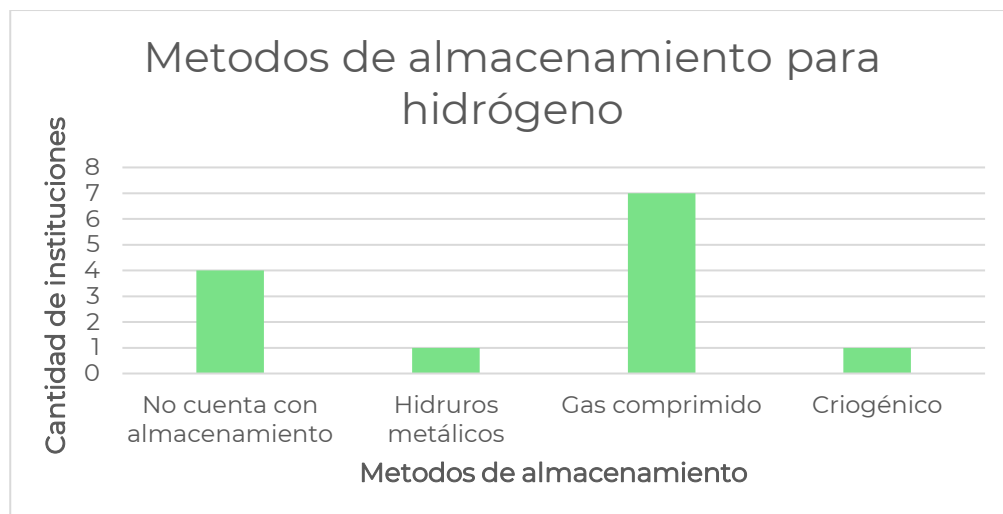
*Figura N°137 Rangos de costo asociados a compresores/boosters para hidrógeno verde, desde menos de 10.000 USD hasta más de 500.000 USD. Respuestas 3/20.*

El acondicionamiento del hidrógeno verde constituye una etapa crítica dentro de los procesos de investigación, desarrollo e innovación, especialmente para validar su viabilidad en aplicaciones reales. Si bien el número de instituciones que declara contar con equipamiento como compresores o boosters es aún limitado, la experiencia recogida en entrevistas y visitas a terreno confirma que estos componentes son fundamentales para alcanzar niveles adecuados de presión y pureza. Ante este escenario, se sugiere avanzar hacia un registro más detallado que permita identificar y asociar sistemáticamente estos equipos a los sistemas de producción, de modo de fortalecer las capacidades nacionales y alinear los esfuerzos de I+D+i con las exigencias del ecosistema industrial emergente.

### 6.3.2.5 Equipamiento para el almacenamiento de hidrógeno verde y derivados de los centros I+D+i

El almacenamiento de hidrógeno verde y sus derivados representa una dimensión clave en la cadena de valor, ya que influye directamente en la continuidad operativa de los procesos de investigación y en la capacidad de escalar soluciones hacia etapas piloto o industriales. La información recolectada permite identificar brechas relevantes en la infraestructura asociada a esta etapa, así como prácticas destacadas que podrían orientar futuras inversiones.

La *Figura N°138*, presentada muestra que, a nivel internacional, el almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso comprimido es el método más comúnmente implementado en los centros de I+D+i. Esta preferencia se alinea con las prácticas observadas en Chile, aunque en menor proporción. No obstante, es relevante señalar que una cantidad significativa de instituciones en ambos contextos declara no contar con ningún tipo de infraestructura de almacenamiento, lo que evidencia una limitación transversal para la experimentación y la continuidad operativa en procesos de investigación. En contraste, tecnologías más avanzadas como el almacenamiento criogénico o en hidruros metálicos son aún marginales en ambos casos, lo que sugiere desafíos comunes en acceso, costo y complejidad tecnológica. Estas observaciones reflejan una oportunidad compartida para fortalecer esta etapa crítica de la cadena de valor.

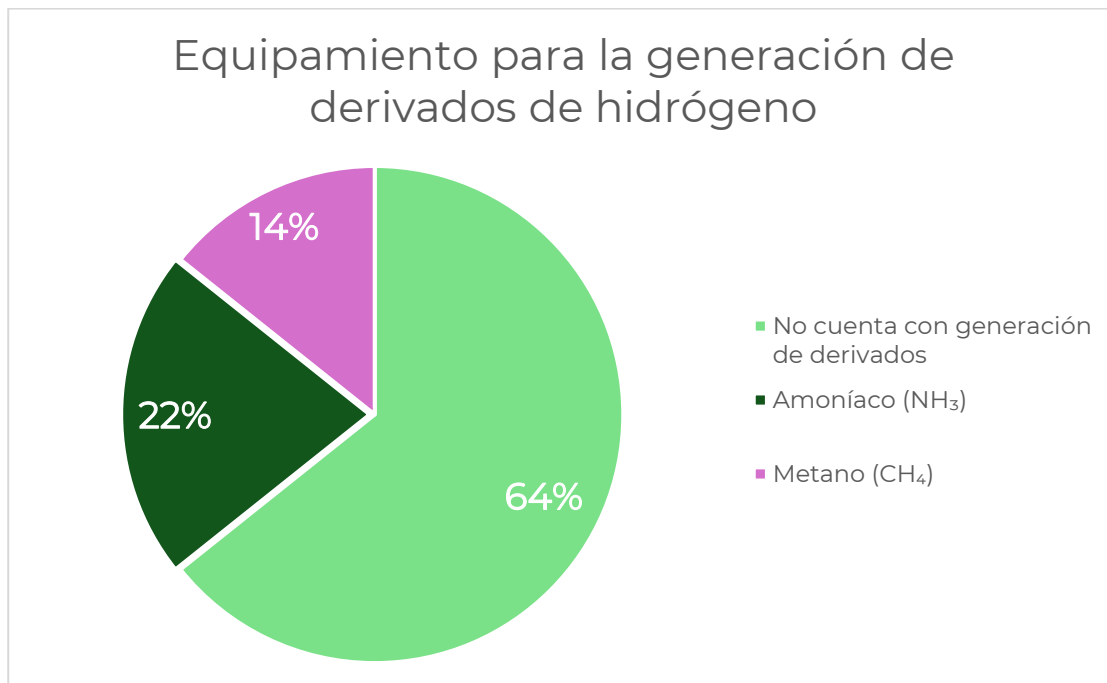


*Figura N°138 Distribución de los métodos de almacenamiento de hidrógeno verde en instituciones de investigación, incluyendo hidruros metálicos, gas comprimido y sistemas criogénicos. Respuestas 13/20.*

En síntesis, la revisión del equipamiento para almacenamiento de hidrógeno en los centros de I+D+i muestra que, tanto a nivel internacional como en Chile, persiste una limitada disponibilidad de soluciones avanzadas. Predomina el uso de sistemas de gas comprimido, mientras que alternativas como el almacenamiento criogénico o en hidruros metálicos son poco frecuentes. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer capacidades en esta etapa clave de la cadena de valor, no solo por motivos técnicos, sino también para habilitar investigaciones que contribuyan a establecer protocolos de seguridad, eficiencia y viabilidad operativa. Fortalecer esta infraestructura permitirá cerrar brechas críticas para el desarrollo experimental, la validación tecnológica y la formación especializada en almacenamiento de hidrógeno y sus derivados.

### 6.3.2.6 Equipamiento para la producción de derivados de hidrógeno de los centros I+D+i

La presente sección aborda el estado del equipamiento disponible en las instituciones internacionales de I+D+i para la producción de derivados del hidrógeno, tales como amoníaco, metano sintético, metanol, entre otros. Esta etapa representa un eslabón clave en la cadena de valor del hidrógeno, especialmente en lo referido al almacenamiento energético de largo plazo, a la producción de combustibles sintéticos y a la articulación con sectores industriales difíciles de descarbonizar. En la *Figura N°139*, se observa que una parte significativa de las instituciones aún no cuenta con capacidades específicas para generar derivados, lo que revela una oportunidad concreta de expansión y especialización para los centros de investigación. El análisis de estos datos permite dimensionar los avances y brechas existentes en esta área estratégica.



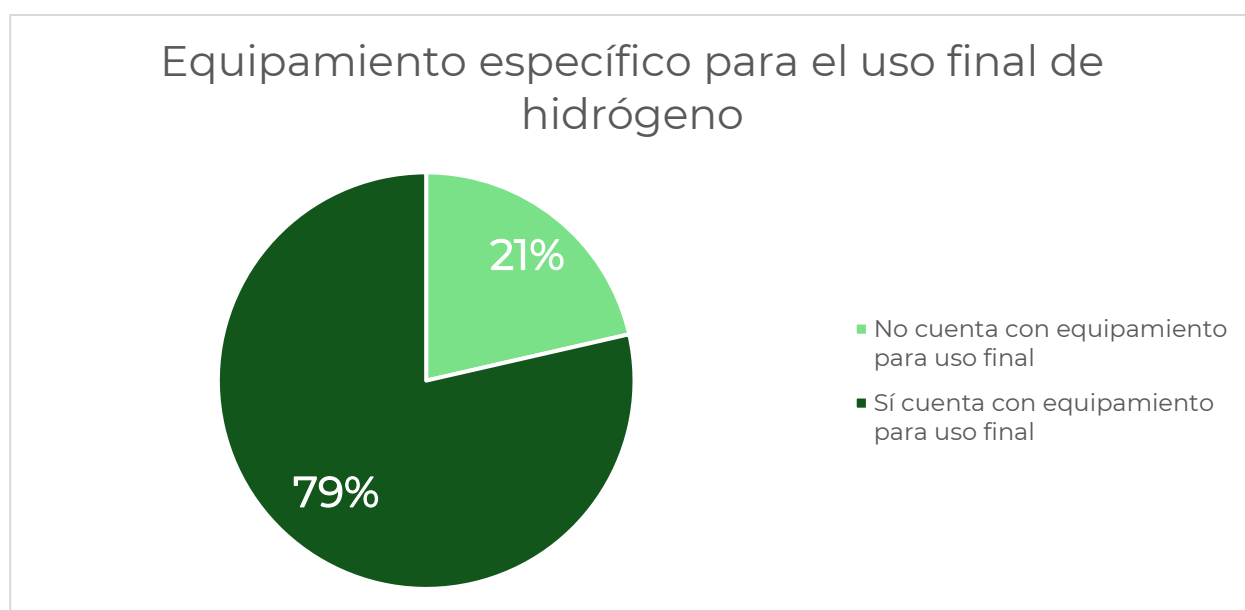
*Figura N°139 Porcentaje de instituciones con equipos para producir derivados del hidrógeno (amoníaco, metano) frente a aquellas sin esta capacidad. Respuestas 14/20.*

El análisis muestra que una proporción relevante de las instituciones encuestadas no cuenta con equipamiento para la generación de derivados del hidrógeno. Si bien es cierto que no todos los centros de I+D+i necesitan abordar esta etapa de manera directa, la capacidad de producir compuestos como amoníaco o metano sí representa un componente estratégico para avanzar hacia una cadena de valor más integrada. La producción de derivados, además de facilitar el almacenamiento y transporte del hidrógeno, habilita aplicaciones industriales con mayor madurez tecnológica, lo que la convierte en un ámbito prioritario para el fortalecimiento del ecosistema de investigación, desarrollo e innovación. Por ello, resulta recomendable que, al menos a nivel nacional, se potencie el acceso a este tipo de equipamiento en centros con vocación experimental y tecnológica avanzada.

### 6.3.2.7 Equipamiento para uso final de hidrógeno verde y derivados de los centros I+D+i

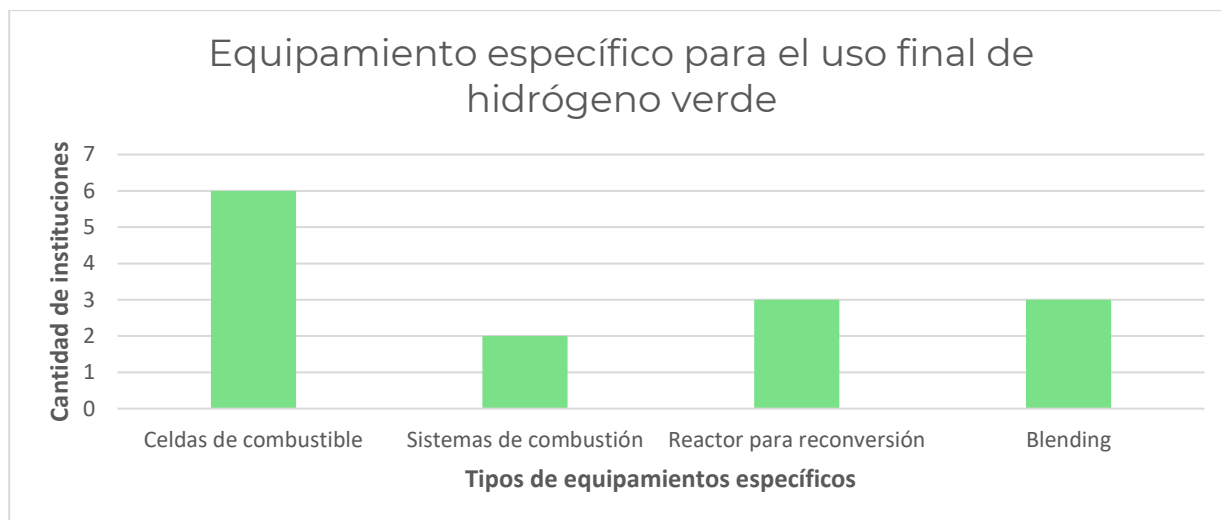
La presente sección aborda el equipamiento disponible en los centros de I+D+i destinado al uso final del hidrógeno verde y sus derivados. Esta etapa de la cadena de valor resulta clave para validar aplicaciones en contextos industriales o energéticos reales, y permite cerrar el ciclo de investigación aplicada desde la producción hasta la utilización. La siguiente figura permite visualizar cuántas instituciones efectivamente cuentan con equipamiento específico para realizar pruebas de uso final.

Tal como se observa en la *Figura N°140*, una parte significativa de las instituciones consultadas declara disponer de este tipo de equipamiento. Este dato resulta especialmente relevante si se considera que la etapa de uso final permite evaluar variables críticas como eficiencia, seguridad operativa y adaptabilidad tecnológica. No obstante, aún existe una proporción de centros que no dispone de infraestructura para esta fase, lo que sugiere oportunidades de fortalecimiento, especialmente en contextos donde se espera una integración directa con industrias usuarias o en proyectos orientados a la demostración tecnológica.



*Figura N°140 Disponibilidad de equipos para uso final de hidrógeno verde en centros de I+D+i, indicando el porcentaje de instituciones con esta infraestructura. Respuestas 14/20.*

La *Figura N°141*, complementa lo señalado anteriormente, al evidenciar que, entre las instituciones que cuentan con equipamiento específico para uso final de hidrógeno verde, predominan las celdas de combustible y otras aplicaciones diversas no estandarizadas. La escasa presencia de turbinas o motores indica que, si bien existe capacidad instalada para validar ciertas aplicaciones, aún se observa una concentración en tecnologías más maduras o accesibles. Esto sugiere que, para fomentar una validación más amplia de tecnologías de uso final, será necesario diversificar el equipamiento y ampliar las capacidades hacia soluciones orientadas a sectores como el transporte, la industria o la generación eléctrica a escala representativa.



*Figura N°141 Tipos de equipamiento específico para uso final de hidrógeno verde reportados por las instituciones, destacando celdas de combustible y sistemas de combustión. (Se admite más de una respuesta) Respuestas 11/20.*

La *Figura N°142*, complementa el análisis anterior al mostrar que gran parte de las instituciones declara no conocer con certeza el costo total asociado a los equipos de uso final de hidrógeno, lo que podría reflejar tanto una baja trazabilidad presupuestaria como la reciente adquisición o planificación de este tipo de tecnologías. Entre quienes sí disponen de información, se observa una distribución en rangos que sugiere que los equipos con aplicaciones prácticas, como celdas de combustible o sistemas específicos, pueden implicar inversiones considerables, especialmente en configuraciones con capacidades demostrativas o industriales.

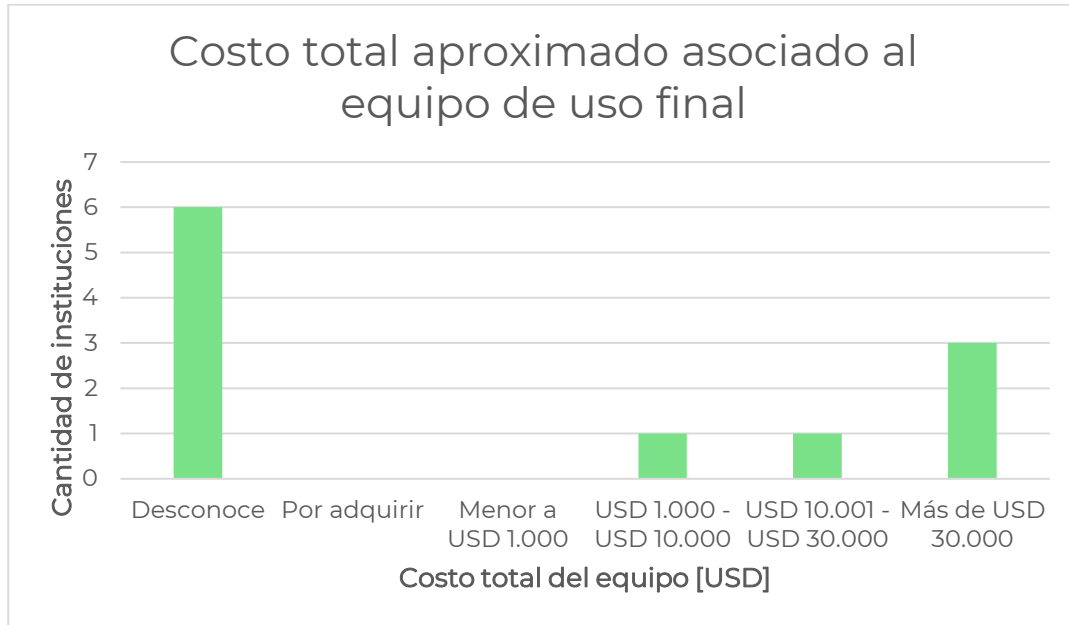


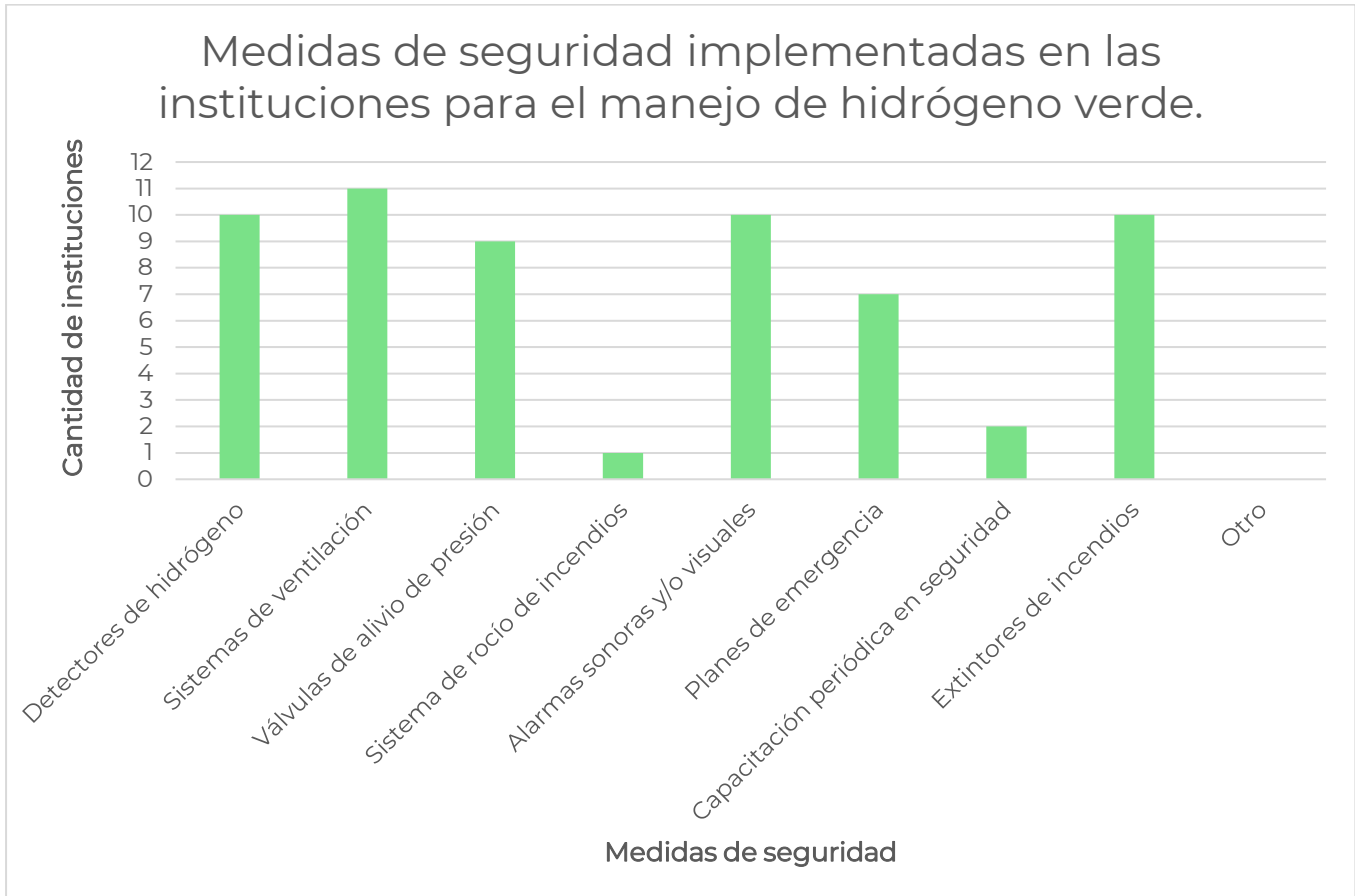
Figura N°142 Distribución de costos asociados a equipos para aplicaciones de hidrógeno verde, clasificados en rangos desde menos de 1.000 USD hasta más de 30.000 USD. Respuestas 11/20.

En conclusión, el uso final del hidrógeno en los centros de investigación internacional consultados muestra una etapa de despliegue aún limitada, con una fuerte presencia de tecnologías probadas pero escasa diversificación. Para fortalecer esta dimensión en el ecosistema chileno, será clave no solo ampliar la inversión en este tipo de equipamiento, sino también sistematizar el seguimiento de sus costos, operación y aplicabilidad, de manera que se pueda evaluar su potencial de transferencia hacia sectores productivos o de servicios.

### 6.3.2.8 Equipamiento de seguridad en instalaciones de hidrógeno verde y derivados de los centros I+D+i

La seguridad es un componente esencial en cualquier instalación que maneje hidrógeno verde, dadas sus propiedades físicas y los riesgos asociados a su almacenamiento, manipulación y uso. La implementación de equipamiento y protocolos adecuados no solo permite resguardar la integridad de las personas e instalaciones, sino también avanzar hacia una mayor confianza y madurez del ecosistema de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en este ámbito. Esta sección examina las medidas de seguridad observadas en instituciones internacionales especializadas, con el fin de identificar buenas prácticas que puedan orientar el fortalecimiento de capacidades en contextos nacionales.

La *Figura N°143*, presentada a continuación muestra el conjunto de medidas de seguridad implementadas por las instituciones consultadas, destacando una alta frecuencia de sistemas críticos como ventilación, válvulas de alivio de presión, planes de emergencia y detectores de hidrógeno. Asimismo, se observan ciertas brechas en aspectos complementarios como alarmas visuales, capacitación periódica o extintores, lo que sugiere áreas susceptibles de fortalecimiento tanto en contextos internacionales como en iniciativas emergentes en Chile.



*Figura N°143 Medidas de seguridad implementadas en instituciones para el manejo de hidrógeno, incluyendo sistemas de ventilación, alivio de presión, detección de incendios y capacitación periódica del personal. (Se admiten más de una respuesta) Respuestas 12/20.*

La gestión de la seguridad en instalaciones asociadas a hidrógeno verde no solo depende de la implementación de medidas físicas, sino también de la formación continua del personal y de la existencia de documentación técnica que respalde los protocolos operativos. Tal como muestra la figura anterior, si bien algunas instituciones han incorporado mecanismos de formación periódica en su mayoría aún no cuentan con prácticas sistemáticas o bien declaran desconocer la frecuencia con la que se realizan estas actividades.

En este contexto, también cobra especial relevancia la existencia de documentación formal sobre seguridad. Cinco de las instituciones encuestadas declararon contar con protocolos escritos actualizados regularmente, lo que constituye una buena práctica que permite estandarizar procedimientos y asegurar su vigencia. Por otro lado, dos instituciones indicaron tener esta documentación, pero señalaron que requiere una actualización, lo que podría traducirse en brechas frente a nuevas exigencias tecnológicas o normativas. Finalmente, una institución informó no contar con este tipo de documentación, lo que representa una debilidad crítica considerando los riesgos asociados al trabajo con hidrógeno.

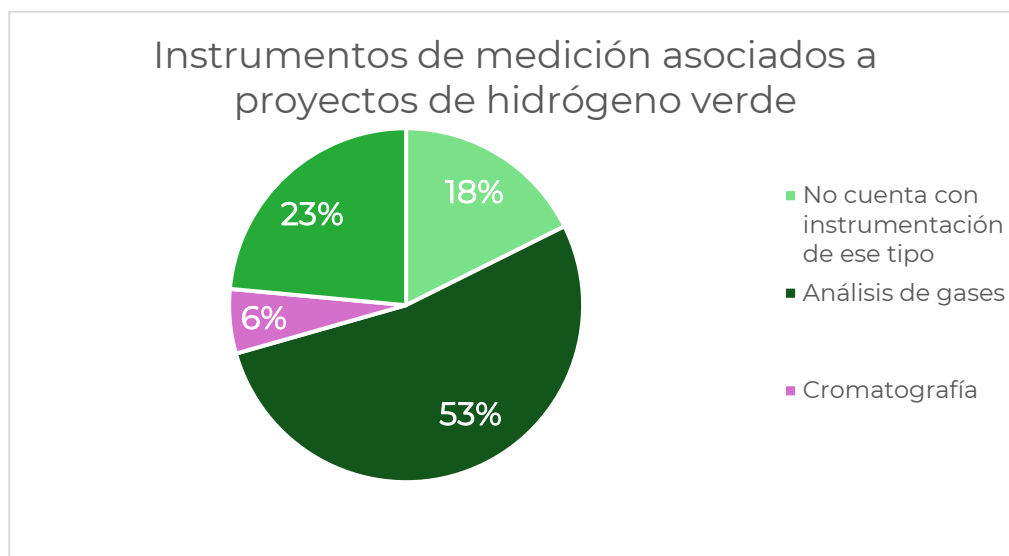
Este panorama refuerza la necesidad de avanzar hacia una institucionalización más robusta de la seguridad, donde la capacitación periódica, la documentación técnica y su actualización permanente

se consoliden como componentes centrales de la operación de los centros de I+D+i. Esto resulta fundamental para asegurar no solo la integridad de las instalaciones, sino también para generar condiciones adecuadas de formación, transferencia tecnológica y validación industrial.

### 6.3.2.9 Equipamiento científico e instrumentación de los centros I+D+i

La presente sección se centra en caracterizar el equipamiento científico e instrumentación disponible en los centros internacionales de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) vinculados al hidrógeno verde. Esta dimensión resulta crítica, dado que la calidad de los datos obtenidos en proyectos experimentales depende en gran medida de la precisión y robustez de los equipos analíticos utilizados. Además, contar con capacidades científicas adecuadas permite avanzar hacia estándares internacionales de validación, facilitar procesos de certificación y fomentar la transferencia tecnológica desde el laboratorio hacia aplicaciones industriales.

Tal como muestra la *Figura N°144*, una mayoría importante de las instituciones consultadas declara contar con equipamiento para análisis de gases, lo que constituye una base fundamental para la caracterización del hidrógeno producido, el seguimiento de procesos y la verificación de pureza. En menor medida, también se registran instrumentos para análisis térmico y técnicas de cromatografía, lo que indica un grado de especialización más avanzado, aunque todavía poco extendido. No obstante, también se observa que una proporción relevante de instituciones carece completamente de este tipo de instrumentación, lo cual representa una brecha significativa considerando el rol central de la medición en proyectos de I+D+i.



*Figura N°144 Distribución porcentual de técnicas analíticas utilizadas en proyectos de hidrógeno verde, destacando análisis de gases, cromatografía y análisis térmico. Respuestas 11/20. (Dos instituciones cuentan con dos instrumentos de medición).*

En comparación con el caso chileno, donde el 47% de los centros de I+D+i declara no contar con ningún tipo de instrumento de medición o análisis asociado a hidrógeno verde, los resultados

internacionales evidencian un nivel de avance significativamente mayor en términos de capacidades científicas básicas. Mientras que varios centros internacionales cuentan al menos con equipamiento para análisis de gases, e incluso con técnicas más complejas como cromatografía o análisis térmico, en Chile estas herramientas son aún escasas o inexistentes en casi la mitad de las instituciones encuestadas. Esta diferencia representa una limitación crítica para la validación experimental, la generación de conocimiento con estándares comparables a los internacionales y la capacidad de aportar al desarrollo de normativas o procesos de certificación técnica. En consecuencia, el fortalecimiento del equipamiento científico debe posicionarse como una prioridad estratégica para cerrar esta brecha, habilitar investigaciones de mayor complejidad y facilitar la articulación con redes globales de innovación en hidrógeno verde.

## 7 Gobernanza y modelos de sostenibilidad internacional

Considerando los resultados del estudio en torno a los modelos de sostenibilidad y gobernanza a nivel internacional, se hace referencia a los contextos de España y Europa, Estados Unidos y Australia, como parte de información sistematizada con base a entrevistas a especialistas del área y complementariamente, para el caso de Estados Unidos, con visitas en terreno y encuestas a centros I+D e instituciones para la formación de personal.

Para ello se describen estos ámbitos considerando tres criterios:

- 1) Alcances sobre la gobernanza e institucionalidad y sus referencias según el contexto internacional.
- 2) Alcances a los modelos de sostenibilidad.
- 3) Desafíos de escalabilidad de proyectos en torno al hidrógeno verde, derivados y afines.

### 7.1 Gobernanza e institucionalidad internacional

El desarrollo del hidrógeno limpio posee el potencial de transformar significativamente la geopolítica energética global. A medida que se consolide su producción y utilización, podría configurarse una nueva geografía del comercio internacional basada en hidrógeno y sus derivados. En este escenario, los países con abundantes recursos renovables podrían posicionarse como exportadores estratégicos de combustibles verdes o como polos de industrialización baja en emisiones.

Asimismo, se prevé un aumento de la competencia tecnológica e industrial entre naciones que buscan liderar segmentos críticos de la cadena de valor del hidrógeno. Este proceso no solo intensificaría la competencia geoeconómica, sino que también incentivaría la formación de nuevas alianzas internacionales y el surgimiento de hubs especializados en la producción, transformación y uso del hidrógeno limpio a nivel global.

En este escenario, en lo relacionado al contexto internacional, es importante referenciar los puntos de vista, enfoques, desafíos y experiencias en materia de gobernanza sobre el hidrógeno verde, sus derivados y afines a partir de las siguientes categorías:

- Despliegue de proyectos y aplicaciones.
- Diálogo público-privado-académico.
- Inversiones y fomento de consorcios

En el contexto del despliegue de proyectos y aplicaciones de hidrógeno verde, distintas experiencias internacionales permiten identificar oportunidades y desafíos relevantes. En el caso de Europa, y particularmente en España, persiste la ausencia de un marco regulatorio unificado a nivel comunitario. Como consecuencia, varios proyectos deben desarrollarse bajo la normativa existente para gas natural, mientras se espera que nuevas leyes impulsen con mayor fuerza la instalación acelerada de infraestructuras de hidrógeno. Esta situación genera tensiones entre la voluntad de avance tecnológico y los tiempos institucionales, ya que, aunque las normativas europeas suelen predominar como referencia, existen países que aplican regulaciones propias, lo cual tiende a ralentizar la implementación de iniciativas (*EGIH2V-101-25*) [15.5].

Por otro lado, en Estados Unidos, la política pública ha tenido avances significativos en el desarrollo del sector, especialmente durante la administración anterior, donde se destinaron recursos importantes para promover industrias limpias. No obstante, voces expertas advierten que la eventual

reducción de fondos destinados a investigación podría generar impactos negativos tanto en las universidades como en la sociedad en general, dado que muchas de las tecnologías clave para la transición energética aún se encuentran en fase de desarrollo (EGIH2V-103-25) [15.5].

Respecto a la colaboración entre los sectores público, privado y académico, el caso estadounidense destaca la importancia de construir alianzas sostenidas que reúnan a gobiernos, empresas y universidades. La conformación de estos ecosistemas requiere tiempo, talento técnico y financiamiento estable, así como una comprensión realista de los plazos que implica consolidar capacidades técnicas, formar personas y escalar soluciones tecnológicas. En este sentido, se sugiere avanzar con pasos firmes, evitando apuros que puedan comprometer la calidad de los resultados (EGIH2V-102-25) [15.5].

Desde la experiencia australiana, se resalta el valor de los actores intermediarios, como universidades, asociaciones industriales u organizaciones sin fines de lucro, en la articulación de iniciativas colaborativas. Estos agentes facilitan el diálogo multisectorial y permiten la construcción de consensos en torno a proyectos de interés común, sin comprometer la propiedad intelectual ni la información sensible de los participantes (EGIH2V-105-25) [15.5].

En cuanto a las estrategias para fomentar inversiones y conformar consorcios, se identifica como condición esencial el asegurar financiamiento inicial significativo para investigación, desarrollo tecnológico y escalamiento precomercial. Una vez alcanzado cierto grado de madurez, se requiere la participación de empresas que lideren la implementación operativa y, fundamentalmente, la existencia de clientes que aseguren la demanda del producto final (EGIH2V-102-25) [15.5]. Además, se enfatiza que el liderazgo en términos de gobernanza debe estar radicado en agencias gubernamentales de alto nivel, con atribuciones para establecer incentivos, coordinar programas y generar condiciones habilitantes para la adopción tecnológica (EGIH2V-104-25) [15.5].

Desde Australia, también se valora la creación de espacios colaborativos donde distintos actores puedan enfrentar retos complejos de manera conjunta, compartiendo esfuerzos sin vulnerar intereses estratégicos. Esta cooperación se presenta como una vía eficiente para avanzar más rápido y con menores costos en el desarrollo de soluciones tecnológicas (EGIH2V-104-25) [15.5].

Finalmente, se observa una tendencia creciente hacia la denominada “diplomacia del hidrógeno”, en la cual múltiples países exploran simultáneamente su potencial como productores y consumidores de este vector energético. En este escenario, una mejor coordinación internacional podría reducir riesgos, fomentar la transparencia y contribuir a la construcción de un mercado global estable y líquido. Para ello, se considera clave avanzar en marcos regulatorios armonizados, mecanismos de certificación conjuntos, apoyo sostenido a la I+D, y la definición de hojas de ruta compartidas para el hidrógeno en el horizonte 2030-2050. Todo esto en línea con los objetivos de seguridad energética y descarbonización profunda de las matrices productivas.

## 7.2 Modelos de sostenibilidad

Al respecto se presentan posturas de actores clave y especialistas entrevistados sobre los modelos de sostenibilidad económica, social, ambiental, de formación de personal y de investigación y desarrollo, con el propósito de considerar recomendaciones y discusiones orientadas a desarrollar la madurez de la industria del hidrógeno verde y sus derivados.

Los alcances sobre los modelos de sostenibilidad para la industria del hidrógeno verde, en este informe se organizan en torno a cinco criterios agrupados sobre desafíos en cuanto a:

1. Personal calificado
2. Aspectos técnicos (I+D)

3. Aspectos económicos
4. Aspectos sociales y
5. Aspectos ambientales.

- Necesidades de personal calificado

En España, se ha destacado un desafío significativo relacionado con la contratación de personal adecuadamente preparado. Según una de las empresas consultadas, este problema “es crítico para nuestra empresa... los jóvenes que ingresan presentan falencias en preparación y actitud laboral” y se observa “una falta de políticas migratorias que faciliten el ingreso de talento calificado” (EDEPH2V-I01-25).

En Estados Unidos, se considera necesario que los profesionales en la industria del hidrógeno posean una formación sólida en disciplinas fundamentales como física, química e ingeniería. Se enfatiza que, incluso en carreras como negocios, es beneficioso complementar la formación con conocimientos técnico-científicos, ya que no es viable restringirse a una única área de especialización durante toda la carrera (EDEPH2V-I02-25).

Un segundo informante estadounidense advierte que es imprescindible desarrollar perfiles técnicos transversales, capaces de comprender tanto sistemas eléctricos de alta tensión como sistemas de gas de alta presión. Destaca que este cruce de competencias “es un vacío formativo que también afecta a reguladores, socorristas y comunidades”, por lo que subraya la importancia de implementar programas de capacitación amplios (EDEPH2V-I03-25).

Otro profesional opina que los equipos de ingeniería deben contar con formación integral en hidrógeno, comprendiendo desde los aspectos moleculares hasta los procesos industriales y su interacción con el entorno energético, para plantear soluciones adaptadas a microrredes o entornos residenciales (EDEPH2V-I04-25).

Desde la perspectiva australiana, se enfatiza la necesidad de atraer y retener ingenieros en las regiones donde se implementan proyectos, evitando que la falta de mano de obra especializada detenga el desarrollo tecnológico local (EDEPH2V-I05-25).

- Desafíos técnicos para I+D

En Estados Unidos, se observa que, aunque la investigación académica es científica y rigurosa, en ocasiones carece de aplicabilidad industrial. Por ejemplo, se menciona que se han desarrollado pruebas con materiales innovadores como la "eco-espuma", pero que estos no siempre resultan adecuados en términos de reducción de costos o volumen en comparación con soluciones industriales reales (EDEPH2V-I02-25).

También se ha señalado que la adopción del hidrógeno verde enfrenta retos asociados a la falta de estándares técnicos en procesos específicos, lo cual dificulta la adaptación a diversas aplicaciones (EDEPH2V-I04-25).

Un tercer entrevistado indica que, si bien existen tecnologías emergentes aún requieren maduración significativa o un aumento en el precio objetivo del hidrógeno limpio para ser competitivas en el mercado (EDEPH2V-I03-25).

En Australia, se destaca que muchos de los conocimientos relevantes ya existen en ámbitos tradicionales, y que las herramientas de capacitación pueden estructurarse en programas cortos, de medio año o incluso de fines de semana, permitiendo así la rápida incorporación al sector (EDEPH2V-I05-25).

- Desafíos económicos

En Europa, preocupa que los niveles salariales no resulten suficientemente atractivos para personal altamente calificado, lo que podría limitar el desarrollo del talento necesario (EDEPH2V-I01-25).

En Estados Unidos, se ha ido adquiriendo conciencia de que el hidrógeno verde, producido por electrólisis, sigue siendo más caro que el hidrógeno gris o azul. Por ello, se considera que los créditos y otros incentivos fiscales serán fundamentales para impulsar nuevos proyectos, especialmente en regiones como Texas, donde los bajos costos de energía fósil dificultan la competitividad del hidrógeno renovable. Se enfatiza la necesidad de apoyo financiero continuo y no solo puntual (EDEPH2V-I03-25).

Asimismo, se destaca que el nivel de madurez y tamaño de las plantas de hidrógeno influye directamente en el costo nivelado del hidrógeno (LCOH), de tal forma que plantas a mayor escala ofrecen mayor competitividad (EDEPH2V-I04-25).

- Percepción social

En EE.UU., se identifica un déficit de conocimiento público sobre los riesgos del hidrógeno, lo que podría inducir reacciones de temor infundadas. Se considera crucial que los centros de formación incluyan programas de divulgación dirigidos tanto a la ciudadanía como a los equipos de emergencia locales. Además, se enfatiza la importancia de contar con liderazgo político que comprenda la urgencia de impulsar esta tecnología (EDEPH2V-I03-25).

En Australia, se mencionan preocupaciones relacionadas con el uso de tierras agrícolas para infraestructura energética, como granjas solares. Sin embargo, se observa que dicha cooperación puede generar nuevos ingresos para los productores locales, favoreciendo una visión positiva sobre el desarrollo energético (EDEPH2V-I05-25).

- Perspectivas medioambientales

En los EE.UU., se señala que el impulso de políticas vinculadas a la tecnología limpia puede variar de acuerdo con predominancias políticas, provocando fluctuaciones en el avance del sector según el contexto gubernamental (EDEPH2V-I02-25).

También se advierte que algunos grupos ecologistas expresan inquietudes respecto al consumo de agua en la producción de hidrógeno. No obstante, se explica que, aunque este uso no contribuye a la pérdida neta de agua a nivel de operación, sí puede ser sensible en zonas con estrés hídrico (EDEPH2V-I03-25).

En Australia, se concluye que la presencia de un entorno industrial consolidado favorece una actitud receptiva de las comunidades hacia proyectos vinculados al hidrógeno, facilitando así su implementación (EDEPH2V-I05-25).

El desarrollo de la industria del hidrógeno verde requiere una respuesta integral que articule formación de capital humano, generación de conocimiento aplicado, adecuación normativa y mecanismos de incentivo económico. Las experiencias internacionales recopiladas reflejan una convergencia en torno a desafíos comunes: la escasez de personal técnico especializado, la necesidad de enfoques formativos transversales, la urgencia de estándares tecnológicos adaptables, y la importancia de construir confianza social e institucional en torno a esta tecnología emergente. Superar estas brechas será clave no solo para viabilizar proyectos individuales, sino para consolidar ecosistemas nacionales de hidrógeno capaces de integrarse competitivamente en un mercado global en expansión.

### 7.3 Desafíos de escalabilidad de proyectos

A partir del análisis de entrevistas realizadas a actores clave del ecosistema internacional, se identificaron posturas, desafíos, problemáticas, fortalezas y oportunidades relacionados con la escalabilidad de proyectos vinculados al desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados. Este levantamiento abarca tanto a instituciones de investigación y desarrollo como a entidades dedicadas a la formación de capital humano especializado. La información fue estructurada en torno a cuatro desafíos principales.

1. Inversiones y coordinación entre múltiples actores;
2. Adquisición de infraestructura y equipamiento a gran escala;
3. Funcionamiento del equipamiento; y
4. Incompatibilidades entre infraestructura existente y nuevos equipamientos.

- Inversiones y coordinación entre múltiples actores

Los entrevistados destacan que la escalabilidad de proyectos de hidrógeno verde depende fuertemente de alianzas público-privadas y del respaldo político sostenido. En el contexto estadounidense, se señala que los cambios en las prioridades gubernamentales pueden afectar gravemente la continuidad de la investigación aplicada, generando discontinuidades perjudiciales para el aprendizaje y el avance industrial (EDEPH2V-I02-25). En este sentido, se releva la importancia de contar con empresas instaladoras calificadas y con experiencia específica en hidrógeno, tanto para la instalación de la infraestructura como para su puesta en marcha (EDEPH2V-I03-25). Desde Australia, se propone un modelo de gobernanza estatal que incluya la propiedad de activos y un sistema de cobro por uso, remitiendo a experiencias previas exitosas como en la industria carbonífera de Queensland (EDEPH2V-I05-25).

- Adquisición de infraestructura y equipamiento

Uno de los principales cuellos de botella identificados corresponde a la falta de componentes diseñados específicamente para operar con hidrógeno. En EE.UU., se expone que actualmente se depende de equipos adaptados desde otras industrias (bombas, válvulas, reguladores) que no garantizan ni la seguridad ni la confiabilidad necesarias para operaciones sostenidas. Esta situación subraya la urgencia de desarrollar una cadena de suministro especializada, capaz de producir componentes certificados y estandarizados para su uso en sistemas de hidrógeno (EDEPH2V-I03-25). En paralelo, se señala que, si bien existen fabricantes de electrolizadores confiables a gran escala, la planificación para transporte y almacenamiento debe abordarse tempranamente, pues representa una inversión aún mayor (EDEPH2V-I02-25). Desde Australia, se enfatiza la necesidad de infraestructura compartida como un factor clave para reducir costos y acelerar la implementación (EDEPH2V-I05-25).

- Funcionamiento del equipamiento

Los desafíos operacionales están estrechamente vinculados con la transferencia tecnológica y la integración de sistemas. Desde EE.UU., se expone la dificultad que enfrentan los centros de investigación para lograr que las empresas adopten nuevas tecnologías, especialmente si no existen clientes dispuestos a comprar el producto final. Esta falta de demanda frena la adopción tecnológica y limita la conexión entre el desarrollo y la industria (EDEPH2V-I02-25). También se identifica como desafío el aprendizaje operativo asociado al manejo de micro redes, destacando la necesidad de optimización continua mediante sistemas de control y software especializado (EDEPH2V-I04-25). En cuanto a integración de dispositivos, se advierte la complejidad que implica hacer interoperables equipos que utilizan distintos protocolos de comunicación, junto con los riesgos asociados a la ciberseguridad en sistemas conectados (EDEPH2V-I03-25). Australia complementa esta mirada

señalando que la etapa precomercial requiere de una colaboración más estrecha, antes de la competencia y diferenciación propias de un mercado maduro (EDEPH2V-I05-25).

- Incompatibilidades de infraestructura existente

Uno de los aspectos más críticos mencionados por los entrevistados es la falta de adecuación entre las infraestructuras existentes y los nuevos equipamientos adquiridos. Desde EE.UU., se señala que este desajuste se manifiesta tanto en la integración general de sistemas como en fallas específicas en componentes secundarios (válvulas, conectores, bombas), lo que evidencia una cadena de suministro aún no adaptada a los requerimientos técnicos del hidrógeno (EDEPH2V-I02-25; EDEPH2V-I03-25). En el caso australiano, se propone avanzar hacia un modelo de instalaciones compartidas para reducir costos y riesgos, permitiendo la escalabilidad progresiva de las soluciones desarrolladas (EDEPH2V-I05-25).

De manera transversal, se identifican tres desafíos estructurales en el contexto internacional que limitan la consolidación del hidrógeno verde como vector energético a gran escala. En primer lugar, la necesidad de reducir los costos de producción y fomentar la inversión mediante mecanismos públicos que disminuyan el riesgo. En segundo lugar, la urgencia de establecer marcos normativos armonizados que regulen la seguridad, sostenibilidad, interoperabilidad y trazabilidad de todo el ecosistema. Finalmente, se plantea que las economías en desarrollo deben ser vistas no solo como proveedoras de recursos energéticos, sino como territorios con potencial de industrialización verde. Esto requiere asistencia tecnológica y financiera para evitar relaciones de dependencia y permitir el desarrollo de capacidades locales.

El conjunto de hallazgos sugiere que la maduración de esta industria dependerá de la articulación de esfuerzos públicos y privados, la inversión sostenida en I+D+i, la consolidación de una cadena de suministro especializada y la adopción de modelos de gobernanza inclusivos, especialmente para los países con potencial energético emergente.

## 8 Desafíos de infraestructura y equipamiento de los centros I+D+i y de las instituciones para la formación de personal

En Chile, los centros de I+D+i y las instituciones de formación de personal 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 de formación de personal 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 de personal especializado 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.

### 8.1 Necesidades y problemáticas en infraestructura

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 medio 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. Esto implica la habilitación de espacios compactos con redes de gas, aire comprimido 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 H<sub>2</sub>V. 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.

## 8.2 Necesidades y problemáticas en equipamiento científico y tecnológico

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 ( $\leq 50$  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.

### 8.3 Necesidades y problemáticas en equipamiento técnico

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.

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 H<sub>2</sub>V 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.

## 9 Conclusiones del levantamiento

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 robusto 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°145, 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) [32].

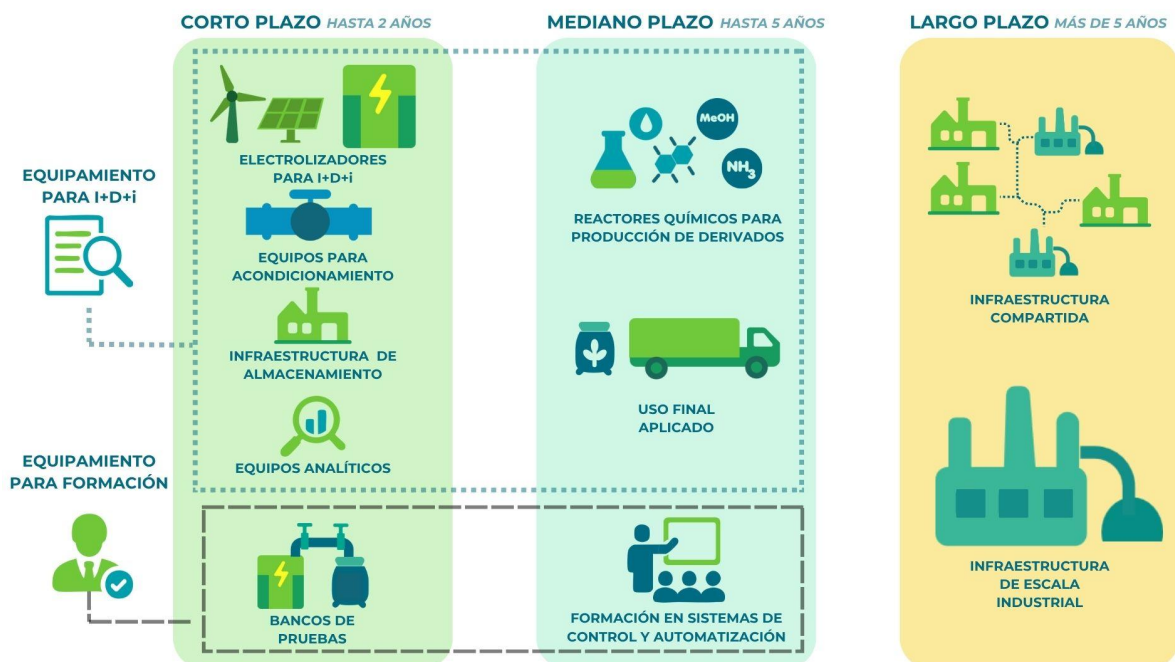


Figura N°145 Esquema de priorización de necesidades de equipamiento.

## 9.1 Corto Plazo (hasta 2027)

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 catorce 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 analítico 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. 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 “10.4 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 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.

## 9.2 Mediano Plazo (hasta 2030)

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. Ninguna de las instituciones encuestadas cuenta con plantas piloto o reactores de síntesis de derivados, y solo una ha planificado un equipo 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 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 H<sub>2</sub> 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  $\geq 250$  kW; calderas industriales para calor de proceso; motores de transporte pesado adaptados al 100% de H<sub>2</sub>; y equipos de generación distribuida basados en pilas de combustible. Solo así se podrán validar las soluciones desarrolladas a nivel piloto en entornos industriales reales.

### 9.3 Largo Plazo (2030 en adelante)

A más largo plazo, el desafío es consolidar un ecosistema nacional robusto, 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 (potencial eólico-desértico) y Magallanes (vientos extremos y acceso a hidrógeno azul). Para 2030, se propone implementar laboratorios modulares distribuidos en macrozonas (norte, centro, sur) 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, carecemos de parques tecnológicos con múltiples líneas de electrólisis, almacenamiento y uso final integrados. Para 2030, el objetivo es contar con al menos dos instalaciones de validación a escala  $\geq 1$  MW de electrólisis, acopladas a un banco de pruebas de 0,5-1 MWh de almacenamiento y equipos de uso final como calderas, celdas y motores con potencias  $\geq 500$  kW. 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, así como en laboratorios acreditados para certificación. 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. Solo así podrá Chile aprovechar plenamente su potencial de energías renovables, formar capital humano calificado y competir de igual a igual en el mercado global de hidrógeno verde.

### 9.4 Tipologías de equipamiento

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°150*. 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 150: 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°151* 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°151: 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.

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

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.

### 9.4.1.1 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



### 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 H<sub>2</sub> 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.

\*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

## 9.4.1.2 Infraestructura eléctrica y agua




### Infraestructura eléctrica e insumos

La calidad y disponibilidad de insumos como energía renovable y agua purificada es crítica para el desarrollo del hidrógeno verde. Esta categoría abarca sistemas de generación eléctrica solar, eólica o hidráulica, junto con soluciones para el tratamiento y suministro de agua desmineralizada. Este equipamiento permite desarrollar I+D+i sobre eficiencia energética en la electrólisis, integración de energías renovables, calidad del insumo hídrico y optimización de la producción de hidrógeno. Además, permite modelar y ensayar esquemas de acoplamiento energético en condiciones reales.

#### 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

##### Energía renovable

###### Equipamiento principal

- Sistemas de generación eléctrica fotovoltaica
- Sistemas de generación eléctrica eólica
- Sistemas de generación eléctrica mareomotriz y undimotriz
- Sistemas de generación hidroeléctrica
- Otros sistemas de generación eléctrica renovable

###### Equipamiento complementario

- Baterías de respaldo
- Inversores y convertidores de potencia
- Transformadores eléctricos
- Sistemas de gestión de energía
- Cables, tableros de control y protecciones eléctricas
- Estaciones meteorológicas y sistemas de control y monitoreo

#### Tratamiento de agua

##### Equipamiento principal

- Sistemas de purificación de agua
  - Osmosis inversa
  - Destilación múltiple
  - Ultrafiltración
  - Intercambiadores iónicos

##### Equipamiento complementario

- Sistemas de captación de agua
- Filtros de partículas y de carbón activado
- Sistemas de dosificación química
- Sensores de calidad del agua
- Bombas de recirculación y distribución
- Tanques de almacenamiento intermedio

#### Otros insumos

##### Equipamiento principal

- Aire o gases auxiliares
  - Compresores de aire
  - Filtros y secadores de aire comprimido
  - Tanques para gases auxiliares
- Reactivos químicos y materiales auxiliares

#### Personal recomendado para la tipología

Debe velar por la operación segura y eficiente de los sistemas de soporte que habilitan la producción de hidrógeno verde, incluyendo generación y respaldo eléctrico, tratamiento de agua y otros insumos técnicos clave.

**Conocimientos requeridos:**

- Fundamentos de electricidad y energías renovables.
- Equipos de respaldo energético.
- Procesos de purificación de agua.
- Instrumentación básica para monitoreo de variables operativas.
- Seguridad industrial basada en el D.S. N°13/2022 y normas internacionales.

**Principales tareas:**

- Operar sistemas eléctricos e hidráulicos de soporte.
- Monitorear parámetros críticos y realizar mantenimiento básico.
- Aplicar protocolos de seguridad y procedimientos correctivos.
- Apoyar mejoras en eficiencia energética e hídrica.

**Perfil propuesto:**  
Técnico de nivel medio o superior en electricidad, electromecánica o energías renovables, con conocimientos en operación de plantas y seguridad industrial.

\*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

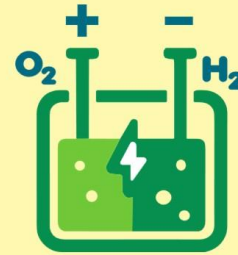
\*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

### 9.4.1.3 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 <sub>2</sub> /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 asegurarse 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.

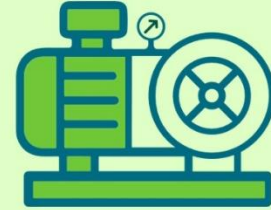
\*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

### 9.4.1.4 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.

## 9.4.1.5 Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados



### Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados

El almacenamiento constituye una etapa crítica en la cadena de valor del hidrógeno verde, ya que permite conservar el gas o sus derivados de forma segura y eficiente para su posterior uso, distribución o conversión. Desde una perspectiva de I+D+i, el estudio de tecnologías de almacenamiento es esencial para evaluar distintos formatos, materiales, condiciones operativas y escalabilidad, especialmente en contextos donde la intermitencia de la producción exige soluciones flexibles.



#### 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 H<sub>2</sub> 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.

<b>Tipo de almacenamiento</b>	<b>Gas presurizado</b>
<b>Tipo de estanque</b>	<b>Tipo III o IV</b>
<b>Presión de trabajo</b>	<b>150 - 400 bar</b>

#### 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.

## 9.4.1.6 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

##### 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.

#### 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

#### 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.

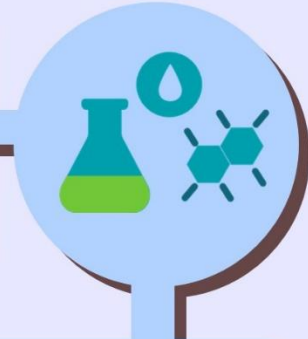
**Perfil propuesto:**  
Técnico de nivel superior en instrumentación, automatización, control de procesos o carreras afines. Se valorará experiencia previa en entornos experimentales, plantas piloto o laboratorios.

### 9.4.1.7 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<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>
  - 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<sub>2</sub>
- 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.

### 9.4.1.8 Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados



## Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados

El transporte y distribución de hidrógeno verde y sus derivados constituye una etapa estratégica en el desarrollo de proyectos de I+D+i. Esta fase no solo implica mover el hidrógeno desde el punto de producción hacia su uso final, sino también validar tecnologías de almacenamiento móvil, compatibilidad de materiales, trazabilidad, monitoreo de condiciones de transporte y control de emisiones o fugas. A través de esta tipología, se habilita investigación aplicada en el diseño y prueba de soluciones para transporte por cilindros, tuberías, contenedores criogénicos o blending con otras sustancias.

**Ubicación de la tipología**

*Ubicación recomendada:*  
Regiones industriales con puertos:  
-Región de Antofagasta  
-Región de Valparaíso  
-Región de Magallanes

**Equipamiento**

**Equipamiento principal**

- Cilindros y racks de alta presión
- Contenedores criogénicos
- Contenedores especiales para almacenamiento de derivados
- Sistemas de blending
  - Mezcladores de gases para combinar hidrógeno con gas natural u otros portadores
- Tuberías y gasoductos
  - Tramos de tubería de acero inoxidable o materiales compuestos.
- Estaciones de regulación y transferencia
- Otros equipos para transporte y distribución de H<sub>2</sub> y derivados

**Equipamiento complementario**

- Sistemas de acondicionamiento
  - Compresores, boosters, secadores entre otros
- Sistemas de control y monitoreo
- Equipamiento de seguridad
- Sistemas de inertización
- Infraestructura de carga y descarga
  - Mangueras, acoples rápidos y sistemas de conexión específicos para H<sub>2</sub> y derivados

**Características recomendadas**

Los sistemas y equipos destinados al transporte y distribución de hidrógeno verde y sus derivados cumplen un rol esencial en la validación de soluciones logísticas dentro de proyectos de investigación, desarrollo e innovación. Estas tecnologías permiten estudiar aspectos clave como la estabilidad del hidrógeno en distintos formatos, la integridad del transporte a distintas escalas, y la compatibilidad de materiales y sistemas con la manipulación segura de estos vectores energéticos.

La configuración de los sistemas de transporte y distribución dependerá en gran medida del tipo de portador energético utilizado, ya sea hidrógeno comprimido, líquido o combinado en derivados como amoníaco, e-metanol u otros. Así, la selección de cilindros, contenedores criogénicos, gasoductos experimentales o estaciones de transferencia deberá responder a las diversas condiciones requeridas por cada proyecto de I+D+i.

Se sugiere seleccionar los equipos considerando su versatilidad operativa, compatibilidad normativa y, especialmente, su relevancia para validar soluciones replicables a mayor escala.



**Personal recomendado para la tipología**

Debe asegurar la manipulación, transferencia y distribución segura y eficiente de hidrógeno verde y sus derivados en entornos de investigación y validación tecnológica.

**Conocimientos requeridos:**

- Fundamentos de manejo de gases comprimidos y criogénicos.
- Tipologías de envases y contenedores para H<sub>2</sub> y derivados.
- Procedimientos de carga, descarga y transferencia bajo presión controlada.
- Normativas de seguridad aplicables al transporte de sustancias peligrosas.
- Sistemas de monitoreo de fugas, presión y temperatura en tránsito.

**Principales tareas:**

- Coordinar y ejecutar operaciones de carga y descarga de hidrógeno o derivados.
- Verificar condiciones de operación antes, durante y después del transporte.
- Aplicar protocolos de seguridad y respuesta ante incidentes durante las maniobras.
- Registrar parámetros logísticos y condiciones del producto transportado.

**Perfil propuesto:**

Técnico de nivel medio o superior en logística, mecánica industrial, química o áreas afines, con formación complementaria en transporte de materiales peligrosos y conocimiento práctico en sistemas presurizados.

\*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.

### 9.4.1.9 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 H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> 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.

## 9.4.1.10 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.

<b>Potencia</b>	<b>0,5 - 50 kW</b> <small>eléctricos</small>
-----------------	---

#### 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.

#### 9.4.1.11 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 sugiere considerar el escalamiento como una dimensión estratégica a incorporar en futuras políticas de financiamiento, planificación territorial y diseño de infraestructura colaborativa para el hidrógeno verde en Chile.

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

Esta sección presenta las 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.

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.

## 9.4.2.1 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-H<sub>2</sub>)
- 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.

## 9.4.2.2 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-H<sub>2</sub>)
- 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 Chilavalora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.*

9.4.2.3 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.

## 9.4.2.4 Banco de pruebas para entrenamiento práctico en seguridad operativa



### Banco de pruebas para entrenamiento práctico en seguridad operativa

Está diseñada para fortalecer las competencias en prevención de riesgos, respuesta ante incidentes y manejo seguro de situaciones críticas en entornos asociados al hidrógeno verde y sus derivados. A través de simulaciones controladas y entornos formativos adaptados, permite capacitar a técnicos, operarios y supervisores en protocolos de seguridad, uso de equipos de protección personal, procedimientos de aislamiento y evacuación, y actuación ante fugas o fallos operacionales.

#### 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**
- **Equipamiento para Almacenamiento** de hidrógeno o derivados
- **Equipamiento para distribución** de hidrógeno o derivados
- Sistemas de control mediante **instrumentación**



#### Personal recomendado para la tipología

Debe supervisar, ejecutar y mejorar entrenamientos prácticos orientados a la prevención de riesgos y la respuesta ante emergencias en instalaciones asociadas a la cadena de valor del hidrógeno verde. Este perfil es clave para garantizar la seguridad del personal y la integridad de los sistemas, mediante la capacitación en protocolos, simulaciones realistas y uso adecuado de equipos de protección. *Se recomienda que el equipo humano de esta tipología cuente con al menos un instalados SEC clase 5.*

**Conocimientos requeridos:**

- Principios de comportamiento del hidrógeno y sus derivados en condiciones normales y críticas.
- Normativa de seguridad aplicable, incluyendo D.S. N°13/2022 y normas internacionales.
- Procedimientos de evacuación, primeros auxilios y contención de incidentes.
- Manejo de simuladores de fallas, válvulas de emergencia, sensores de fuga y otros equipos de seguridad industrial.
- Uso y mantención de equipos de protección personal (EPP) especializados.

**Principales tareas:**

- Coordinar y ejecutar entrenamientos prácticos de seguridad y emergencias.
- Simular escenarios de riesgo para instrucción del personal en condiciones seguras.
- Validar protocolos operativos y planes de contingencia en instalaciones formativas.
- Monitorear cumplimiento de normativas y estándares de seguridad durante las sesiones.
- Apoyar la documentación técnica de evaluaciones y lecciones aprendidas.

**Perfil propuesto:**  
Técnico o profesional en prevención de riesgos, seguridad industrial o ingeniería con especialización en manejo de sustancias peligrosas. Se valorará experiencia en hidrógeno o sectores afines.

#### Perfil del personal en formación:

- Técnicos en prevención de riesgos, electricidad, mecánica, química o automatización que trabajan o se preparan para desempeñarse en instalaciones vinculadas al hidrógeno.
- Personal de brigadas de emergencia industrial, cuerpos de bomberos, unidades HAZMAT y servicios de seguridad que deben intervenir en situaciones de riesgo con hidrógeno u otros gases combustibles.
- Operadores, mantenedores o supervisores de centros de I+D+i, plantas piloto o bancos de pruebas que necesitan formación complementaria en protocolos de seguridad.
- Estudiantes de carreras técnicas y profesionales afines que buscan especialización en la manipulación segura de vectores energéticos emergentes.

\*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.

## 10 Costos asociados a cada tipología

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 INT-3 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 experiencias nacionales como internacionales, cotizaciones reales gestionadas por Institución N, y bases técnicas de proyectos públicos como la licitación de A1 y el caso de A2. Estos antecedentes proporcionan un respaldo técnico y financiero robusto para el análisis que se presenta a continuación.

## 10.1 Costo nivelado del hidrógeno verde

Este apartado muestra el costo nivelado del hidrógeno verde (LCOH) para instalaciones de la escala de kilo Watts (kW), con tal de poder incorporar este costo a los OPEX de las tipologías que lo requieran y así respaldar el valor asociado a la producción de hidrógeno verde en condiciones de laboratorio o plantas piloto en escalas inferiores a las industriales.

El análisis del costo nivelado del hidrógeno en instalaciones de pequeña escala se apoya en referencias técnicas recientes. El estudio de optimización técnico económica de sistemas solares para producción de hidrógeno verde incluye resultados asociados a la modelación de un sistema con un electrolizador alcalino de 8 kW, obteniendo un LCOH de 3,79 USD/kg, valor que constituye la referencia más cercana identificada para escalas reducidas [33].

En términos generales, el LCOH actual para proyectos de hidrógeno verde, sin considerar transporte ni almacenamiento, se encuentra en un rango de 3 a 8 USD/kg. Informes publicados en 2024 [34] señalan incrementos recientes de entre el 30 % y el 65 %, situando los valores entre 4,5 y 6,5 USD/kg, cifras consistentes con la referencia de 3,79 USD/kg obtenida para pequeña escala.

Con respecto a las proyecciones, se estima que para 2030 el LCOH del hidrógeno electrolítico pueda descender a un rango de 1,6-1,9 USD/kg, impulsado por una expansión global de capacidad de hasta 250 GW y las correspondientes economías de escala [35]. A más largo plazo, las proyecciones sitúan el LCOH del hidrógeno renovable no subsidiado en 2,5-4,0 USD/kg para finales de esta década, e incluso en 1-2 USD/kg hacia 2050, siempre que se consoliden los avances tecnológicos y la reducción de costes de los electrolizadores, que podrían abarataarse hasta un 45 % en 2030 y un 70 % en 2050 respecto a los niveles actuales [34].

Cabe destacar que los estudios a gran escala reflejan costes nivelados sustancialmente menores gracias a las economías de escala, por lo que un sistema de pequeña escala difícilmente alcanzaría las reducciones previstas para proyectos de varios giga Watts, situándose previsiblemente en un rango próximo o algo superior a los 3,79 USD/kg observados para 8 kW.

En síntesis, la incorporación de un LCOH de referencia para instalaciones de potencia reducida permite sustentar con rigor técnico los costos operacionales asociados a sistemas de hidrógeno verde en laboratorios y plantas piloto, aportando una base sólida para proyecciones presupuestarias realistas y fundamentadas. Si bien las economías de escala prometen disminuir sustancialmente los costos a nivel industrial en las próximas décadas, resulta prudente considerar para proyectos de pequeña escala rangos cercanos a los valores actualmente modelados, reforzando así la viabilidad técnica y económica de las iniciativas de demostración y validación tecnológica.

## 10.2 Costos de Inversión y operación para cada tipología

A continuación, se detallan los equipos principales y secundarios asociados a la inversión para cada tipología. En primer lugar, se detalla cada tipología.

### 10.2.1 Infraestructura física y edificación:

El estudio contempla el levantamiento de los costos de inversión de la infraestructura, los cuales son: Laboratorios, plantas piloto, bancos de prueba, pruebas de campo, entre otras. Dentro de los datos levantados, se pudo constatar valores de inversión en infraestructura. Sin embargo, no todas las instituciones cuentan con inversión en infraestructura debido a que comparten sus centros con otras entidades. A continuación, en la *Tabla N°35*, se muestra un resumen de la información extraída de la encuesta, sobre los costos de inversión en infraestructura física recopilados por encuestas a centros de I+D en Chile, España, Colombia y China. Se evaluaron cuatro categorías: laboratorios, plantas piloto, bancos de prueba y zonas de prueba de campo, con rangos de inversión expresados en USD.

*Tabla N°35 Información respecto a los costos de infraestructura y edificación, extraída de la encuesta de los centros de investigación y desarrollo del estudio.*

Institución (país)	Laboratorios	Planta Piloto	Bancos de Prueba	Zona de Prueba de Campo
Institución U	500.001-1.000.000 USD	500.001-1.000.000 USD	500.001-1.000.000 USD	50.001-500.000 USD
Institución W	No hay inversión	1.000.001-10.000.000 USD	No hay inversión	No hay inversión
Institución Y	No hay inversión	No hay inversión	50.001-500.000 USD	No hay inversión
Institución Z	500.001-1.000.000 USD	1.000.001-10.000.000 USD	No hay inversión	No hay inversión
Institución G	No hay inversión	50.001-500.000 USD	No hay inversión	No hay inversión
Institución H	Hasta 10.000 USD	No hay inversión	10.001-50.000 USD	No hay inversión
Institución J	No hay inversión	No hay inversión	500.001-1.000.000 USD	50.001-500.000 USD
Institución K	50.001-500.000 USD	No hay inversión	10.001-50.000 USD	No hay inversión
Institución L	50.001-500.000 USD	No hay inversión	No hay inversión	No hay inversión
Institución N	Hasta 10.000 USD	50.001-500.000 USD	10.001-50.000 USD	No hay inversión
Institución INT-8	No hay inversión	50.001-500.000 USD	50.001-500.000 USD	No hay inversión
Institución INT-13	1.000.001-10.000.000 USD	1.000.001-10.000.000 USD	1.000.001-10.000.000 USD	1.000.001-10.000.000 USD
Institución INT-12	Hasta 10.000 USD	Hasta 10.000 USD	No hay inversión	No hay inversión
Institución INT-11	10.001-50.000 USD	10.001-50.000 USD	Hasta 10.000 USD	Hasta 10.000 USD
Institución INT-9	10.000.001-20.000.000 USD	Más de 20.000.000 USD	10.000.001-20.000.000 USD	10.000.001-20.000.000 USD

En Chile, se observa una gran disparidad en capacidad instalada: Institución U, Institución J e Institución Z reportan inversiones relevantes, especialmente en plantas piloto y bancos de prueba (500.000-1.000.000 USD), mientras que otras entidades, como Institución Y, Institución H o Institución L, tienen infraestructura mínima o nula. En el extranjero, instituciones como INT-13 (España) e INT-9 (China) declararon inversiones superiores a 1.000.000 USD en todas las categorías, destacando inversiones de hasta 20.000.000 USD en China, lo que refleja una escala y nivel de madurez tecnológica más alto.

Según la literatura especializada, los laboratorios y equipos de medición tienen una vida útil estimada entre 10 y 15 años, mientras que las plantas piloto y zonas de pruebas de campo suelen operar entre 15 y 20 años antes de requerir renovaciones significativas [36] [37]. La depreciación contable, siguiendo sistemas como MACRS o lineal, se ubica en el rango de 5-10 % anual, según la categoría de activo. Por su parte, los costos de mantención representan aproximadamente entre 3-5 % del capital invertido al año, como se observa también en estudios de infraestructura industrial similar [38]. A continuación, en la *Figura N°146* se presentan algunos edificios que conforman la infraestructura física identificada en las visitas a terreno para este estudio.



*Figura N°146 (a) infraestructura para sistema completo de hidrógeno en Institución INT-3; (b) infraestructura física de planta piloto en Institución J (Chile); (c) Infraestructura física para producción y uso de hidrógeno verde y azul en Institución INT-1.*

Estas cifras implican que una planta piloto evaluada en 1.000.000 USD, por ejemplo, debería prever una depreciación anual de 50-100.000 USD y gastos de operación y mantención de entre 30.000 y 50.000 USD. La evidencia internacional indica que tanto el arrendamiento de infraestructura como los contratos de O&M externos pueden reducir el costo total de propiedad (TCO) y mejorar la sostenibilidad financiera.

## 10.2.2 Infraestructura eléctrica e insumos

Tal como se planteó en los capítulos anteriores esta categoría abarca sistemas de generación eléctrica solar y eólica, junto con soluciones para el tratamiento y suministro de agua desmineralizada. Este equipamiento permite desarrollar I+D+i sobre eficiencia energética en la electrólisis, integración de energías renovables, calidad del insumo hídrico y optimización de la producción de hidrógeno. A continuación, algunos de los equipos principales.

Como parte del análisis de costos asociados a la infraestructura eléctrica, se ha realizado una recopilación de proyectos internacionales de hidrógeno verde con distintas configuraciones tecnológicas, a partir de los cuales se elaboraron tablas comparativas que permiten identificar rangos típicos de inversión, costos por módulo fotovoltaico o turbina, y gastos de operación y mantenimiento (O&M).

Estas tablas presentan una recopilación de proyectos piloto internacionales que combinan fuentes de energía renovable con sistemas de electrólisis. Se incluyen datos de potencia instalada, tipo de fuente energética y número de módulos o turbinas. La diversidad entre los casos permite observar tanto soluciones de gran escala como configuraciones de microrred, útiles para entender el rango tecnológico y operativo de cada caso.

### Sistemas solares fotovoltaicos:

La *Tabla N°36* presenta el número de módulos fotovoltaicos instalados en una selección de centros internacionales dedicados a la producción de hidrógeno verde, así como las tecnologías asociadas en cada caso. Se observa una diversidad significativa en cuanto a escala, configuración y tecnologías utilizadas. El proyecto del CENTRO 1 destaca por su dimensión, con más de 2.000 módulos Trina Solar conectados a inversores SMA y un sistema de electrólisis [39]. En contraste, proyectos como los del CENTRO 2 o CENTRO 3 representan configuraciones de microrred con menos de 250 módulos, integrando electrólisis alcalina y/o PEM junto con almacenamiento en baterías [40]. En el CENTRO 4, se estima la instalación de más de 1.500 módulos LONGi conectados a un sistema híbrido con electrólisis PEM [41]. Por otro lado, el CENTRO 5 representa un caso singular por el uso combinado de tecnologías CPV (fotovoltaica de concentración) y SiPV (silicio cristalino), con y sin sistemas de seguimiento solar, lo que refleja un enfoque experimental altamente técnico [42].

*Tabla N°36 Número de módulos instaladas por proyecto y tipo de tecnología asociada.*

Centro I+D (País)	Nº de módulos	Observaciones / Tecnología
CENTRO 1 [39]	2.052 módulos PV	Módulos Trina Solar, inversores SMA, electrólisis Accelera (Hydrogenics)
CENTRO 2 [43]	224 módulos PV	Electrólisis alcalina y PEM, banco de baterías
CENTRO 3	~36 módulos PV (estimación)	Proyecto en fase de desarrollo con electrólisis solar futura
CENTRO 4 [41]	1.584 módulos (cálculo)	Módulos LONGi, electrólisis PEM, Hybrid Systems Australia
CENTRO 5	245 módulos PV	CPV Sumitomo / SiPV con y sin seguimiento

La *Tabla N°37* se muestra la potencia total instalada y la potencia promedio por módulo en cada proyecto, lo cual permite analizar la densidad tecnológica y la escala relativa de las instalaciones. Se

observa una variación importante en la capacidad por módulo, desde configuraciones de baja eficiencia como en el CENTRO 2 (45 W/módulo) [43] hasta tecnologías avanzadas como los módulos LONGi de 445 W en el CENTRO 4 [41]. El caso del CENTRO 5 destaca por combinar CPV de menor potencia (~152 W) con módulos SiPV de mayor rendimiento (~330 W), lo que refleja un enfoque experimental orientado a la comparación de tecnologías bajo condiciones reales [42].

*Tabla N°37 Potencia total y específica de generación por módulo, que refleja la escala y densidad tecnológica.*

Proyecto	Potencia total instalada (kW)	Potencia por módulo (W)
CENTRO 1	800,28	390 W
CENTRO 2 [43]	10,08	45 W
CENTRO 3 [40]	11,52	~320 W (estimación)
CENTRO 4	704,88	445 W
CENTRO 5	51	CPV: ~152 W / SiPV: ~330 W

La *Tabla N°38* presenta los costos totales estimados de cada proyecto y los costos específicos asociados al sistema fotovoltaico, permitiendo calcular un valor promedio por módulo instalado. Se evidencian diferencias notables en los niveles de inversión, tanto a nivel global como unitario. Por ejemplo, el CENTRO 3 muestra un costo por módulo relativamente elevado (~555 USD) [40]. En cambio, proyectos como los del CENTRO 1 y CENTRO 4 reflejan economías de escala más favorables, con costos por módulo por debajo de los 130 USD [44] [45]. Estos valores permiten comparar la eficiencia económica relativa entre configuraciones tecnológicas y escalas de implementación.

*Tabla N°38 Costos totales estimados de los sistemas fotovoltaicos por proyecto, junto con el costo promedio por módulo instalado (USD/unidad).*

Proyecto	Costo total del proyecto (USD)	Costo del sistema	Costo por módulo fotovoltaico (USD)
CENTRO 1 [44]	8.000.000	220.000 USD	107
CENTRO 2	193.563	50.000 USD	223
CENTRO 3 [40]	6.000.000	20.000 USD	555
CENTRO 4 [45]	6.500.000	198.000 USD	125
CENTRO 5	5.000.000	50.000 USD	204

En el presente análisis, la *Tabla N°39* resume los costos específicos de operación y mantenimiento (O&M) en USD/kW/año, así como los costos anuales totales estimados para cada proyecto fotovoltaico. Los valores reflejan variaciones regionales y de escala: mientras que proyectos en Asia como los del CENTRO 2 y CENTRO 3 presentan costos unitarios bajos (entre 3,8 y 4 USD/kW/año), instalaciones en Australia y Brasil alcanzan valores más altos, en torno a 7-7,3 USD/kW/año. Estas diferencias pueden atribuirse a factores como el tamaño del sistema, la complejidad tecnológica y los costos de operación locales. Los costos totales anuales resultan directamente proporcionales a la potencia instalada [46].

Tabla N°39 Costos específicos de operación y mantenimiento (O&M) de los proyectos fotovoltaicos en USD/kW/año, y costos anuales totales estimados por proyecto según tecnología y región.

Proyecto	Costos de operación y mantenimiento (USD/kW/año)	Costos O&M totales (USD/año)
CENTRO 1	7,3	5.842
CENTRO 2	3,8	38
CENTRO 3	4	46
CENTRO 4	7,1	5.004
CENTRO 5	7,1	362

A continuación, en la Figura N°147 se presentan sistemas fotovoltaicos presentes en algunas de las visitas realizadas para este estudio.



Figura N°147 (a) Paneles fotovoltaicos utilizados para producción de hidrógeno por Institución B; (b) Paneles fotovoltaicos utilizados para producción de hidrógeno por Institución A.

**Sistemas eólicos:** La Tabla N°40 presenta el número de turbinas instaladas por proyecto, junto con observaciones sobre las tecnologías utilizadas en sistemas de electrólisis alimentados exclusivamente por energía eólica. En todos los casos se trata de instalaciones piloto de pequeña escala, implementadas entre 2003 y 2005, lo que resalta su carácter pionero. El proyecto del CENTRO 6 emplea dos turbinas Proven Energy en un sistema de Microred insular, mientras que el CENTRO 7 combina dos turbinas de diferente capacidad con dos tipos de electrólisis [47]. Por su parte, el CENTRO 8 implementa una turbina de 60 kW junto con almacenamiento de hidrógeno, en una estrategia híbrida para garantizar el suministro [48]. Estos casos permiten analizar configuraciones

reales de integración eólica-H<sub>2</sub> a escala descentralizada. En la *Figura N°148* se puede apreciar el sistema eólico utilizado por HIF en la región de Magallanes en Chile.



*Figura N°148 Turbina eólica de proyecto HIF en la región de Magallanes, Chile.*

*Tabla N°40 Número de turbinas eólicas instaladas y tecnología asociada.*

Centro I+D (País)	N° de turbinas	Observaciones / Tecnología
CENTRO 6	2 turbinas eólicas	Turbinas Proven Energy, electrólisis Accagen/SiGen
CENTRO 7 [47]	2 turbinas eólicas	Turbinas Bergey (10 kW) y Northern Power (100 kW); electrólisis alcalina y PEM; acoplamiento directo e integración con almacenamiento de hidrógeno
CENTRO 8 [48]	1 turbina eólica	Turbina Vergnet (60 kW, velocidad variable); electrólisis alcalina; almacenamiento H <sub>2</sub> y generador de respaldo

Dentro de la *Tabla N°41* se muestra la potencia total instalada y la potencia unitaria por turbina en cada uno de los proyectos eólicos analizados. Se confirma el carácter experimental de estas iniciativas, con potencias individuales entre 10 kW y 100 kW, lo que las sitúa dentro del rango de pequeña escala. El CENTRO 6, con dos turbinas de 15 kW cada una, constituye un ejemplo clásico de Microred autónoma. En el caso del CENTRO 7, se destaca la combinación de dos turbinas de capacidades distintas (10 kW y 100 kW), lo que permitió evaluar la interacción entre diferentes escalas dentro de un mismo sistema [47]. El CENTRO 8 implementa una única turbina de 60 kW, reflejando un enfoque de mayor potencia unitaria con integración de almacenamiento [48]. Estas configuraciones aportan referencias valiosas para el análisis de densidad tecnológica en contextos piloto.

*Tabla N°41 Potencia total y específica por turbina eólica (kW).*

Proyecto	Potencia total instalada (kW)	Potencia por turbina (W)
CENTRO 6 [48]	30	15.000 W
CENTRO 7 [47]	110	10.000 W / 100.000 W
CENTRO 8 [48]	60	60.000 W

En la *Tabla N°42* se resumen los costos totales del sistema eólico y el costo promedio por turbina en diferentes proyectos piloto. Se observa una amplia variabilidad, reflejo de la diversidad tecnológica y de escala de cada iniciativa. El CENTRO 6 representa una inversión modesta, con un costo total de 1 millón USD y un costo por turbina de 96.000 USD, correspondiente a turbinas pequeñas de 15 kW [48]. En contraste, el CENTRO 7 muestra un mayor rango de costos del sistema (550.000-600.000 USD), asociado a la combinación de turbinas de 10 kW y 100 kW, con costos por turbina que van de 40.000 a 530.000 USD respectivamente. Finalmente, el CENTRO 8 destaca por su mayor inversión total (8,2 millones USD) [49] y costos unitarios entre 240.000 y 320.000 USD. Estos datos son útiles para comprender las diferencias en costos relacionadas con la capacidad instalada y la tecnología empleada en los proyectos eólicos piloto de hidrógeno.

*Tabla N°42 Costos totales estimados y costos unitarios por turbina en proyectos piloto eólicos para producción de hidrógeno.*

Proyecto	Costo total del proyecto (USD)	Costo del sistema	Costo por turbina (USD)
CENTRO 6	1.000.000	192.000 USD	96.000
CENTRO 7 [50]	2.000.000	550.000-600.000 USD	10 kW Bergey Excel-S: 40.000 100 kW NorthWind 100: 530.000
CENTRO 8	8.200.000	240.000 - 320.000 USD	240.000 - 320.000

En la *Tabla N°43* se detallan los costos específicos de operación y mantenimiento (O&M) expresados en USD por kW instalado y año, junto con los costos anuales totales estimados por proyecto. El CENTRO 6 presenta los costos más bajos, con 22 USD/kW/año y un costo anual total de apenas 660 USD, en línea con su pequeña escala. Por su parte, el CENTRO 7 alcanza los 40 USD/kW/año, lo que se traduce en un gasto anual de 4.400 USD, reflejando una mayor capacidad instalada. En el caso del CENTRO 8, se adopta el mismo valor de referencia de 40 USD/kW/año, lo que genera un costo anual estimado de 2.400 USD. Estas cifras ilustran cómo los costos de O&M tienden a incrementarse con la escala del sistema, aunque también dependen del contexto operativo y las condiciones técnicas de cada proyecto [46].

*Tabla N°43 Costos específicos y totales estimados de operación y mantenimiento (O&M) en proyectos piloto eólicos para producción de hidrógeno.*

Proyecto	Costos de operación y mantenimiento (USD/kW/año)	Costos O&M totales (USD/año)
CENTRO 6	22	660
CENTRO 7	40	4400
CENTRO 8	40, Valor de referencia (EE. UU.)	2400

### Desionizador de agua:

Para asegurar el correcto funcionamiento de un electrolizador, uno de los requerimientos fundamentales es el uso de agua desionizada. Para cumplir con esta condición, se utilizan desionizadores de agua, los cuales se convierten en un componente esencial dentro de la infraestructura de una planta de hidrógeno verde, bancos de prueba y otras instalaciones similares. Por tanto, este equipo es clave para garantizar la operación eficiente y segura de los sistemas basados en electrólisis.

En la *Tabla N°44*, se presenta la información técnica de los desionizadores de agua recopilada a partir de las encuestas aplicadas a los centros de investigación y desarrollo identificados en el estudio.

*Tabla N°44 Información técnica y rangos de costo de desionizadores de agua utilizados en centros de investigación y desarrollo.*

Centro (País)	Fabricante	Modelo	Costo (INCOTERM) USD	Producción de agua (L/h)
Institución INT-19	EnviroFALK (EnviroWater Group)	High-purity system (customizable)	30.000-60.000 (EXW)	100-25.000
Institución INT-17	Werner Reinstwassertechnik (partner integrators)	Compact RO module	6.200-6.800 (EXW)	1000
Institución INT-18	Enapter	Water Tank Module (V/TM) 2.1	3.600 (DDP)	60
Institución INT-5	Merck Milipore	CLX 7080	1.000-1.500 (EXW)	80
Institución INT-1	Evoqua Water Technologies	VANTAGE® PTC SDI Tank, 34L	3.850 (EXW)	300
Institución N	ELGA Veolia	PURELAB CHORUS 2 (RO/DI) 20 L/HR	4.710 (DDP)	20
Institución N	Resintech /	CLIR 3000 Series	6.900 (DDP)	150
Institución INT-18	BWT AG (Best Water Technology)	Bonaqua 500	2.100 (EXW)	78

A partir de los equipos analizados, se puede concluir lo siguiente. Equipamiento de desionización de agua, se puede encontrar en el mercado internacional como nacional. Particularmente en empresas que representan equipamiento de laboratorios. En el estudio se pudo obtener cotizaciones formales de equipamiento que pueda ser entregado sin la necesidad de importar.

### 10.2.3 Producción de hidrógeno verde

Dentro del estudio se han podido identificar distintas tecnologías de producción del hidrógeno, donde la tecnología en común son los electrolizadores. A continuación, en la *Tabla N°45* se presenta la Información técnica y rangos de costos de los electrolizadores utilizados en los centros de investigación y desarrollo.

*Tabla N°45 Información técnica y rangos de costos de los electrolizadores utilizados en los centros de investigación y desarrollo.*

Centro (País)	I+D	Fabricante	Modelo	Tecnología	Precio de equipo USD (EXW)	Producción normalizada (kg/día)
Institución INT-17		Siemens	Silyzer 200	Proton Exchange Membrane (PEM)	2.187.500-3.000.000	480
Institución INT-6		ITM Power	HGas containerized unit) (early PEM)	Proton Exchange Membrane (PEM)	1.200.000-2.000.000	260
Institución INT-14		ITM Power	TRIDENT 0.5	Proton Exchange Membrane (PEM)	800.000-1.000.000	220
Institución INT-20		HyProvide	A-Series	Alkaline Electrolyser	600.000-770.000	388,8
Institución INT-6		Sin Info	Sin Info	Anion Exchange Membrane (AEM)	150.000-220.000	24
Institución INT-18		Nel Hydrogen	H6	Proton change Membrane (PEM)	85.000-125.000	12,95
Institución INT-19		SolydEra SpA	G8 Stack	Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC) / Fuel	11.250-22.500	(sin datos)
Institución INT-18		Enapter	EL 4.0 (Air Cooled)	Anion Exchange Membrane (AEM)	12.000-14.000	1,08

Durante el estudio, se pudo investigar distintos centros de investigación en el extranjero, los cuales fueron identificados como centros de investigación y desarrollo de interés. La fuente de las características técnicas y económicas están escritas en formato IEEE, algunas fueron chequeadas en sitio web especializados, y otras, en las mismas visitas técnicas realizadas para el estudio. Para seguir recopilando costos del equipamiento para producción de hidrógeno, se consultó a la literatura donde se pudo extraer la siguiente información de costos y potencias, resumidos en la Tabla N°46.

*Tabla N°46 Resumen de costos y potencias típicas de celdas de combustible tipo PEM, recopilados a partir de fuentes internacionales, estudios técnicos y experiencias piloto en proyectos reales.*

Fuente	Tecnología	Potencia típica (kW)	Costo estimado USD (neto por equipo)	Observación
GIZ - Producción y Costos H2-GNA	PEM	50-100	150.000-300.000 USD	Cotizaciones directas de mercado chileno en 2021 para proyectos piloto de baja escala. Estudio elaborado para Ministerio de Energía y cooperación alemana. Costos actuales en proyectos reales en Chile.
Agencia SE - Aprendizajes H2V	PEM	30-60	120.000-250.000 USD	Resultados recopilados por la Agencia SE en el marco de su programa "Aceleradora de Hidrógeno Verde" (2023), sobre experiencias concretas en universidades, centros tecnológicos y empresas piloto en Chile. Refleja costos de adquisiciones recientes en el país.

WHB Masterclass	PEM	10-50	20.000-125.000 USD	Documento formativo internacional (2024), usado como referencia por profesionales del sector. Presenta rangos generales de CAPEX PEM a escala baja, mencionando que los electrolizadores de baja capacidad tienden a tener un costo por KW elevado.
-----------------	-----	-------	--------------------	---

Dentro de la *Tabla N°47*, se recopila información de distintas cotizaciones de proyectos semi industriales (10-50 KW) para la instalación en terreno nacional y datos extraídos en las encuestas realizadas.

*Tabla N°47 Cotizaciones de electrolizadores tipo PEM para proyectos semi industriales (10-50 kW), recopiladas a partir de fuentes nacionales e internacionales.*

Fuente	Tecnología	Potencia típica (KW)	Costo estimado USD (neto por equipo)
TRA Propuestas - ENAPTER y "Horizon Fuel Cell Technologies"	PEM	10-20	100.000-200.000 USD (DDP)
Luyang 三折页 (总)	PEM	20-50	150.000-250.000 USD (EXW)
Encuestas Nacionales realizadas	PEM	10-50	20.000-125.000 USD (DDP)

Ahora bien, se pudo exponer a su consideración los datos de costos de inversión, principalmente de los equipos principales, estructurados de lo general a lo particular asociado a este estudio en particular.

A continuación, dentro de la *Tabla N°48* se hace un análisis de logística y comercio exterior, una vez más fundamentado en la literatura disponible y casos prácticos. En primer lugar, se resumen la experiencia reportada en Chile sobre costos de logística y comercio exterior asociados a la importación de electrolizadores según referencias bibliográficas. Cabe destacar que las importaciones en este análisis son basadas en los costos CIF, que es un Incoterm que significa "Cost, Insurance and Freight", que indica que el vendedor asume los costos, seguro y flete hasta el puerto de destino. El riesgo se transfiere al comprador al embarcar la mercancía- Por lo que, los porcentajes de cada ítem asociados a los costos de logística y comercio exterior está basado en dicho valor.

*Tabla N°48 Estimación de costos logísticos y de importación para equipos tecnológicos menores a 100 kW, incluyendo transporte, seguros y tributos en Chile.*

Concepto	% típico sobre valor CIF	Estimación en USD por equipo (<100 KW)	Observación (fuente y contexto)
Transporte internacional Marítimo (Europa, China o EE.UU. → Chile)	5%-15% del valor CIF	8.000-18.000 USD	Basado en costos reportados en <i>GIZ H2-GNA</i> , y en experiencias de importación documentadas por <i>Agencia SE Aceleradora H2V</i> . Incluye flete marítimo, embalaje especial, seguro internacional.
Seguro de transporte internacional	~1% del valor CIF	1.000-3.000 USD	Incluido habitualmente en cotizaciones o como ítem separado (GIZ, Agencia SE).
Costos de importación (agente aduanal, tasas portuarias, almacenaje)	2%-5% del valor CIF	5.000-10.000 USD	Desglose proporcionado en talleres GIZ y validado en <i>Aceleradora H2V</i> (proyectos piloto chilenos).
Aranceles aduaneros (Chile)	0% (exento)	,	Aplicación de exención por Decreto DS 100/2012, confirmado en <i>Agencia SE</i> y GIZ.
IVA	19% (reembolsable o exento en I+D)	,	IVA estándar de Chile (19%), reembolsable para universidades y proyectos I+D (Agencia SE).

A continuación, se presenta en la *Figura N°149* algunos electrolizadores utilizados por instituciones visitadas en las actividades de este estudio.



(a)

(b)

(c)

*Figura N°149 (a) Electrolizador PEM - Institución G; (b) Electrolizador PEM - Institución B; (c) Electrolizadores AEM - Institución A.*

En el análisis destaca la posibilidad de no tener aranceles aduaneros en caso de la importación de tecnologías renovables. La importación de electrolizadores en Chile es relevante destacar un beneficio clave: actualmente, estos equipos están exentos de arancel aduanero (0%), al ser clasificados como bienes de capital y equipos para la generación de energía limpia o tecnologías renovables. Esta exención, se basa en la aplicación del Decreto Supremo N° 100/2012 del Ministerio de Hacienda, que exige del pago de aranceles a bienes destinados a las energías renovables no convencionales (ERNC), y es complementada por la Ley N° 20.571/2012 sobre net billing. En la práctica, las partidas arancelarias empleadas en las importaciones de electrolizadores en Chile han sido las 8502.31.10 ("Grupos electrógenos con energía renovable") y 8419.89.90 / 8419.60.00 (equipos de transformación química por calor y energía eléctrica), confirmándose en todos los casos su exención arancelaria. Dicho análisis fue realizado en los programas de la Agencia SE (*Aceleradora H2V*) y en el estudio "Producción y Costos H2-GNA" de GIZ.

Siguiendo con el análisis de costos de logística y comercio exterior, se expone un ejemplo práctico dentro de la *Figura N°150* para un mayor entendimiento de los costos de inversión de los equipos principales de la producción de hidrógeno. Para ello, se tomará en cuenta la adquisición de un Electrolizador de procedencia China para la investigación y desarrollo.

En primer lugar, se identifica la compra de un electrolizador LM-3000 de la empresa Jinan Green Lab Instruments Co., Ltd ubicado en No.554 Zhengfeng Road, High-tech Zone, Jinan, China. Donde se detalla un precio de 8.400 USD la unidad, luego 1.335 USD (13,67% valor CIF) por costos de envío valor y 15 (0,1% valor CIF) por seguro. Es decir, un valor 9.750 USD valor CIF. Concordante con la tabla anteriormente presentada.

Commercial Invoice				
Seller: Jinan Green Lab Instrument Co., Ltd.		Invoice No.: GR20230904IN		
Address: No.554 Zhengfeng Road, High-tech Zone, Jinan, China				
Tel: 86-531-82661516				
Buyer: Quempin SPA		Date: September, 04, 2023		
Tax ID: 76.772.215-k				
Address: Carlos Fernando 983, Viña del mar, Valparaíso, Chile				
Tel: +56961435392				
Transport Details: Shipment from Jinan, China to Valparaíso Chile By Sea				
Trade Term: CIF Valparaíso Chile				
Payment Term: T/T				
Mark of Packing	Description of Goods	Quantity (SET)	Unit Price (USD)	Amount (USD)
Quempin SPA C/No: 1/1	Hydrogen Generator LM-3000	1	8400	8400
Shipping Cost By Sea				1335
Insurance Fee				15
TOTAL				9,750
SAY US DOLLARS NINE THOUSAND SEVEN HUNDRED AND FIFTY IN TOTAL ONLY				

*Figura N°150 INVOICE Electrolizador LM-3000 para Institución N, caso estudio proceso de importación electrolizador desde China.*

Luego, se hace el análisis de los costos de internación, basados en los gastos entregados por un agente de aduanas. En este caso práctico presentado en la *Figura N°151*, será la Agencia de Aduana Carlos Zulueta, encargado de la importación del electrolizador LM-3000 de Jinan Green Lab Instrument Co. Ltd. Cabe recordar que El agente de aduanas en Chile es un profesional autorizado que facilita las operaciones de comercio exterior, asegurando el cumplimiento de la normativa vigente. Su rol consiste en representar a importadores y exportadores ante el Servicio Nacional de Aduanas, optimizando tiempos y costos logísticos. Para importaciones con un valor CIF superior a 1.000 USD, la intervención de un agente de aduanas es obligatoria; en operaciones por debajo de este umbral, el importador puede realizar el trámite directamente.



PROVISION DE FONDOS  
AG. DE ADUANA CARLOS P. ZULUETA G. Y CIA. LTDA.

Señor(es):  
QUEMPIN SPA  
CARLOS FERNANDO 983  
76.772.215-K

SANTIAGO; martes 30 enero 2024  
Atención a:

Presente

Materia	: SOLICITA PROVISION DE FONDOS	Operación	: IMPORT.CTDO/NORMAL
Ref.	: 29903031	Fecha B/L	: 26/11/2023
Nº Manif.	: 238520	Fecha	: 31/12/2023
Nave	: COSCO SHIPPING SEINE	Eta	: 31/12/2023
Fob us\$	: 9.585,00	Seguro us\$	: 15,00
Flete us\$	: 150,00	Cif us\$	: 9.750,00
País	: CHINA	País Adq.	: CHINA
Fecha Vencimiento G.C.P.:		Consignante	: JINAN GREEN LAB INSTRUMENT CO.LTD.
Mercadería	: GENERADOR DE HIDROGENO; J.G.L.I.-F; LM-3000; ELECTRICO; PARA P		
Observacion	:		

Por medio de la presente solicito a Ud. la provisión de fondos para el despacho: **446476** (Nº Dcl: 6530446476-8 ) según el siguiente detalle:

Concepto	Valor en \$
DERECHOS DE ADUANA	518.509
IVA ADUANERO	1.740.462
HONORARIOS AGENCIA	94.000
Gastos de Despacho	60.000
ALMACENAJE	795.000
IVA SERVICIOS	200.260
<b>Total Prov.Fdos</b>	<b>3.513.231</b>

**Cheque a Tesorería:** TESORERIA GENERAL DE LA REPUBLICA por: 2.258.971


**Cheque a Agencia:** AG. DE ADUANA CARLOS P. ZULUETA G. Y CIA. LTDA. por: 1.149.260

\*Los valores solicitados en esta Provision de Fondos son estimativos. Los valores exactos seran los indicados en nuestra factura, los que pueden ser superiores o inferiores a esta Provision.  
Los gastos generados en PTLA posteriores al pago de los tributos seran de exclusiva responsabilidad de los importadores\*

Figura N°151 Provisión de gastos para Institución N, caso estudio proceso de importación electrolizador desde China.

Dentro de los costos se encuentra los derechos de aduana, (518.509 CLP≈500 USD, 6% Costo CIF) que puedes ser eximidos por del Decreto Supremo N° 100/2012 del Ministerio de Hacienda, que exige del pago de aranceles a bienes destinados a las energías renovables no convencionales (ERNC) o bien, por el tratado de libre comercio con China, donde el procedimiento en presentar el Certificado de Origen, como el presentado en la *Figura N°152*. Dicho documento exime del pago del derecho de aduana presentado. Luego el IVA aduanero (1.740.462 CLP≈1.700 USD) que es el 19% del Costo CIF. Adicionalmente, los gastos de despacho (60.000 CLP≈60 USD, 0.7% del costo CIF), gastos de almacenaje (795.000 CLP≈790 USD, 9% Valor CIF) y honorarios de agencia (94.000 CLP≈ 100 USD, 1% del costo CIF). Finalmente, en la *Figura N° 153* se tiene el pago de desconsolidación, manifiesto, manejo, corrección BL. Para la empresa transportista (284.550 CLP≈290 USD, .3,29% Valor CIF)

**ORIGINAL**

<p>1. Exporter's name, address, country: JINAN GREEN LAB INSTRUMENT CO., LTD. ADDRESS: NO. 554 ZHENGPENG ROAD, HIGH-TECH ZONE, JINAN CHINA TEL: 86-531-82661516</p>		<p>Certificate No.: F245661472320001</p>				
<p>2. Producer's name and address, country: JINAN GREEN LAB INSTRUMENT CO., LTD. ADDRESS: NO. 554 ZHENGPENG ROAD, HIGH-TECH ZONE, JINAN CHINA TEL: 86-531-82661516</p>		<p><b>CERTIFICATE OF ORIGIN</b> <b>Form for China-Chile FTA</b></p> <p>Issued in <u>THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA</u> (see Instruction overleaf)</p>				
<p>3. Consignee's name, address, country: QUEMPIN SPA VAT TAX: 76.772.215-K ADDRESS: CARLOS FERNANDO 983, VINA DEL MAR, VALPARAISO, CHILE TEL: +56961435392</p>		<p>For Official Use Only</p>				
<p>4. Means of transport and route (as far as known)</p> <p>Departure Date NOV. 26, 2023</p> <p>Vessel/Flight/Train/Vehicle No. COSCO SHIPPING SEINE 033E</p> <p>Port of loading QINGDAO, CHINA</p> <p>Port of discharge VALPARAISO, CHILE</p>		<p>Verification: origin.customs.gov.cn</p>				
		<p>5. Remarks ISSUED RETROACTIVELY</p>				
6. Item number	7. Marks and packages No.	8. Number and kind of packages; description of goods	9. HS code (Six digit code)	10. Origin criterion	11. Net weight or quantity, with unit of measurement	12. Number(s) and date(s) of invoice(s)
1	QUEMPIN SPA C/WO: 1/1	ONE (1) CASE OF HYDROGEN GENERATOR LM-3000 *** **	8543.30	"WP"	1SET	GR20230904IN SEP. 04, 2023
<p>13. Declaration by the exporter or producer</p> <p>The undersigned hereby declares that the above details and statement are correct, that all the goods were produced in</p> <p>..... CHINA (Country)</p> <p>and that they comply with the origin requirements specified in the China-Chile FTA for the goods exported to</p> <p>..... CHILE (Importing country) <i>史悦</i></p> <p>Jinan, China, FEB. 06, 2024</p> <p>Place and date, signature of authorised signatory</p>			<p>14. Certification</p> <p>On the basis of control carried out, it is hereby certified that the declaration made by the exporter or producer is correct.</p> <div style="text-align: center;">  <p>2443000039324</p> </div> <p>Jinan, China, FEB. 06, 2024</p> <p>Place and date, signature and stamp of authorised body <i>He</i></p>			

1930078335

Figura N°152 Certificado de origen de electrolizador LM-3000 para Institución N, caso estudio proceso de importación electrolizador desde China.

<b>LIDER TRANSPORTE CHILE SPA.</b> GIRO: SERV. TRANSP. INTERN EN TODAS SUS MODALID DE CARGA ASE. INTEG. EN COM EXT NUEVA YORK 57, DEPTO. 501, SANTIAGO		<b>RUT.: 76.689.700-2</b> <b>FACTURA ELECTRONICA</b> <b>N° 4273</b>			
S.J.L. - SANTIAGO CENTRO					
Señor(es)	QUEMPIN SPA	RUT	76.772.215-K		
Giro	FABRICACION DE HORNOS, CALDERAS Y QUEMAD	Fecha Emisión	25 de enero de 2024		
Dirección	CARLOS FERNANDO 983 VIÑA DEL MAR VALPARAISO CHILE	Comuna	VIÑA DEL MAR		
Contacto	CRISTOBAL MONZO				
DETALLES					
N°	Descripción	Cant/Unidad	Prec. Unit.	Ind	Total
1	COD: 16 - POR CONCEPTO DE GASTOS LOCALES DE IMPORTACION MARITIMA, SEGUN: BL(H)29903031 MN: COSCO SHIPPING SEINE V.033E POL: QINGDAO POD: SAN ANTONIO CARGA: 1 BULTOS / 76.00 KGS / 0.55 CBM DESCONSOLIDACION, MANIFIESTO, MANEJO, CORRECCION BL	1	284.550	AF	284.550
<b>TOTALES</b>					
Monto Neto					284.550
19% IVA					54.065
Monto Total					338.615

Figura N°153 Factura de gastos de importación para el electrolizador.

En resumen, podemos entregar los siguientes valores de nuestro caso de estudio para la importación de un electrolizador desde China, el cual está dentro de los rangos presentados anteriormente por literatura y respaldados por las figuras adjuntas. A continuación, dentro de la *Tabla N°49* se presenta un resumen del caso de estudio para la importación de un electrolizador desde China.

Tabla N°49 Detalle de costos asociados a la importación de un electrolizador desde China en un caso de estudio aplicado.

Descripción	Valor (USD/CLP)	% sobre valor CIF
Costo del electrolizador LM-3000	8,400 USD	-
Costo de envío	1,335 USD	13.67 %
Seguro	15 USD	0.10 %
Valor CIF total	9,750 USD	100%
Derechos de aduana (pueden ser eximidos por DS 100/2012 o TLC)	518,509 CLP	6%
IVA aduanero (19% sobre CIF)	1,740,462 CLP	19%
Gastos de despacho	60,000 CLP	0.7 %
Gastos de almacenaje	795,000 CLP	9%
Honorarios de agencia de aduanas	94,000 CLP	1%
Desconsolidación, manifiesto, manejo, corrección BL	284,550 CLP	3.29 %

Ahora bien, analizando la depreciación del mismo caso de estudio del electrolizador de pequeña escala valorizado en 8.400 USD bajo condición EWX (Ex Works, sin incluir transporte, seguros ni impuestos), debe analizarse tributariamente bajo los lineamientos de la legislación vigente en Chile.

Según la Tabla de Vida Útil de los Bienes Físicos del Activo Inmovilizado [51], emitida por el Servicio de Impuestos Internos (SII), (vigente desde el 1 de enero de 2003 por Resolución Exenta N° 43) este tipo de equipamiento se clasifica como maquinaria o equipo industrial, con una vida útil tributaria estándar de 10 años. En este marco, y siguiendo el artículo 31 N°5 de la Ley sobre Impuesto a la Renta (LIR), dicho activo puede ser depreciado mediante el método lineal, imputando como gasto deducible el 10% anual de su valor original. Esto se traduce en una rebaja contable constante durante una década, reflejando el desgaste económico del bien en función de su vida útil fiscal. Es decir, una depreciación como se indica en la *Tabla N°50*.

*Tabla N°50 Ejemplo de depreciación lineal aplicada a un electrolizador de pequeña escala valorizado en 8.400 USD.*

Año	Valor libro inicial [USD]	Depreciación Anual [USD]	Valor libro Final [USD]
1	8.400	840	7.560
2	7.560	840	6.720
...	...	...	...
10	840	840	0

Es importante agregar al análisis que al tratarse de un electrolizador que podría ser operado en HUB de Hidrógeno expuestos anteriormente y que sea considerando como zona extrema del país, como la Región de Magallanes, se habilita la posibilidad de aplicar el régimen de depreciación acelerada, también contemplado en el artículo 31 N°5 de la LIR. Tal como lo indica la *Tabla N°51*.

*Tabla N°51 Cálculo de depreciación acelerada en 3 años para un electrolizador de 8.400 USD operado en zona extrema (Magallanes), conforme al artículo 31 N°5 de la LIR.*

Año	Valor libro inicial [USD]	Depreciación Anual [USD]	Valor libro Final [USD]
1	8.400	2.800	5.600
2	5.600	2.800	2.800
3	2.800	2.800	0

Esta modalidad permite distribuir el costo del activo en un plazo significativamente menor, típicamente en tres años, lo que otorga ventajas tributarias y financieras relevantes para proyectos intensivos en capital. Dado que el electrolizador estará sujeto a uso experimental intensivo, y considerando la velocidad de obsolescencia tecnológica de estas soluciones, la aceleración del proceso de depreciación no solo es tributariamente admisible, sino también económicamente justificada.

Adicionalmente, esta medida se alinea con los objetivos del Estado de Chile en cuanto a fomentar la inversión productiva en zonas extremas mediante incentivos tributarios, reconocidos en diversos instrumentos legales y presupuestarios. En particular, Magallanes ha sido declarada zona prioritaria para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, por lo que la aplicación de esta herramienta resulta coherente con la política pública vigente.

En resumen, si el electrolizador es operado en regiones bajo régimen general (como la zona central del país), se recomienda utilizar la depreciación lineal sobre 10 años. En cambio, si la operación se realiza en zonas extremas como Magallanes, es altamente recomendable optar por la depreciación

acelerada en tres años, mejorando el perfil financiero del proyecto y maximizando los beneficios tributarios disponibles para infraestructura científico-tecnológica.

## 10.2.4 Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados

Tal como se ha venido desarrollando en el estudio, el acondicionamiento está asociado a la purificación, secado y compresión del hidrógeno producido para prepararlo para su almacenamiento o transporte. Dentro del estudio al menos 3 centros encuestados contaban con algún equipo principal para el acondicionamiento. En esta sección se evaluarán los costos principales, de logística y comercio exterior para poder contar con equipos asociados al equipamiento. Para dicho análisis serán analizados: Compresores de hidrógeno y secadores para hidrógeno.

**Compresores de hidrógeno:** Al igual del desarrollo del almacenamiento. Los compresores de hidrógeno serán analizados en grupo, dentro de la *Tabla N°52* comparando origen, características técnicas y precios. Luego, se hará un análisis de un caso ejemplo para determinar los costos de importación.

*Tabla N°52 Características técnicas y precios referenciales de compresores de hidrógeno identificados en centros encuestados y fuentes internacionales.*

Proveedor	Marca / Modelo	Origen	Capacidad técnica	Precio equipo (USD)
LW Americas	LW 300 E III H2 VD15 410 bar + Control Unit + TÜV cert.	USA	27 Nm <sup>3</sup> /h, 410 bar, 7,5 KW	78.442 (EXW) + 18.640 (control) + 7.800 (certif.)
SHANGHAI SOLLANT ENERGY SAVING TECHNOLOGY CO., LTD	G70Z-4/16-60	China	4 to 5,65 Nm <sup>3</sup> /h	21.846 USD (FOB)
Mariscope	BST/H2-RC/4/400/50 COLTRI	Italia / Distribuidor en Chile	4 KW, hasta 400 bar	9,700 USD (DDP)
Jiangsu Huayan	G70Z-4/15-50 (Hydrogen diaphragm compressor)	China	4 Nm <sup>3</sup> /h, 5 MPa (50 bar), 4 KW	19.860 (water cool.) / 22.435 (air cool.) CIF Certification incluido
Wuxi Dase	OLT-200-H2 gas boosting system	China	No especificado (Pneumatic), componente de boosting	7.120 + 1.650 (Certification)+ 645 (CIF)

Dentro de los compresores de hidrógeno analizados destaca el amplio rango de precios de los equipos de similares condiciones. Los compresores responden a equipos semi industriales para plantas compatibles con centro de investigación y desarrollo. Adicionalmente, se profundizó en contar con certificación asociada al uso de hidrógeno, con el fin de contar con documentación necesaria para la certificación de plantas de hidrógeno en Chile. Algunas como LW Americas realizada un cobro de 7.800 USD (10% del Valor FOB), lo mismo con Wuxi Dase realizaba un cobro de 1.650 USD (21% del Valor CIF) por certificaciones para uso de hidrógeno, además de un cobro de 645 USD por envío para puerto en Chile (8% del Valor FOB). Finalmente, Mariscope representante de COLTRI en Chile tienen la ventaja de importar distintos compresores, cuentan con certificaciones para el uso de compresores para hidrógeno y los costos de logística y comercio exterior vienen incluidos.

En resumen, se muestra la *Tabla N°53* con los costos de transporte y comercio exterior de la siguiente forma:

*Tabla N°53 Costos adicionales de transporte, certificación y logística asociados a compresores de hidrógeno importados.*

Proveedor	Certificación (USD)	Logística / Packing (USD)	Transporte (shipping, USD)	Total costos adicionales (USD)	% sobre valor CIF (aprox.)	Detalle de cómo se calcula el total costos adicionales	Observación
LW Americas	7.800 (TÜV cert.)	1.200 (wooden packing)	4.000 (maritime USA → Chile, estimado)	13.000	~12-13%	7.800 + 1.200 + 4.000 = ~13,000 USD	EXW a USA; transporte a contratar por comprador.
Shanghai Sollant	No informado	Incluido	3.200 (maritime China → Chile, estimado)	3.200	~15%	Costos comercio Exterior habitual desde China	FOB Shanghai. Hay que costear seguro y desaduanaje en Chile.
Mariscope / COLTRI	Incluido (homologación H <sub>2</sub> )	Incluido (DDP)	Incluido (DDP)	0	0%	Todo incluido en DDP	Todo incluido en DDP; entrega directa en Chile; incluye certificación H <sub>2</sub> .
Jiangsu Huayan	Incluido en CIF	Incluido en CIF	Incluido en CIF	0	0%	Certificado y envío incluidos en CIF	CIF incluye certificación y shipping.
Wuxi Daze	1.650 (certificación H <sub>2</sub> )	Incluido (packing no detallado)	645 (CIF door Chile)	2.295	~29%	1.650 + 645 = 2.295 USD	Boosting neumático; costos adicionales bien especificados.

A continuación, en la *Figura N°154* se presentan compresores identificados en las visitas a terreno realizadas para este estudio.



(a)



(b)

*Figura N°154 Compresores para elevación de presión hasta 200 barg utilizados en proyectos I+D+i en Chile. (a) Compresor recíprocante utilizado por Institución G; (b) Compresor recíprocante utilizado por Institución A.*

**Secadores de hidrógeno:** En los sistemas de electrólisis basados en membrana de intercambio de protones (PEM), la integración de un sistema de secado de hidrógeno es un componente técnico indispensable. Dado que el hidrógeno producido por celdas PEM se genera saturado en vapor de agua, propio del mecanismo electroquímico de operación, es necesario incorporar una etapa de acondicionamiento que permita cumplir con los requisitos de calidad del gas.

La presencia de humedad en el hidrógeno afecta de manera directa la confiabilidad y eficiencia de los equipos aguas abajo, tales como compresores, sistemas de almacenamiento o unidades de conversión, e impide alcanzar los estándares de pureza requeridos en aplicaciones críticas (por ejemplo, ISO 14687 establece límites de humedad inferiores a 5 ppm). Además, introduce riesgos operacionales, como la posibilidad de condensación en líneas de proceso, formación de hielo en etapas de expansión o almacenamiento a alta presión, y fallos prematuros por corrosión.

Desde una perspectiva de eficiencia operativa y optimización de costos, el secado adecuado del hidrógeno permite maximizar la vida útil de los equipos, reducir intervenciones de mantenimiento no programadas y asegurar la continuidad operacional del sistema.

En este contexto, a continuación, dentro de la

*Tabla N°54* se presentan los elementos técnicos y los costos asociados a la incorporación de secadores de hidrógeno en instalaciones PEM, considerando diferentes escalas de operación y configuraciones tecnológica

*Tabla N°54 Equipos secadores de hidrógeno identificados para sistemas PEM, según tipo, precio, caudal y características técnicas.*

Marca / Modelo	Tipo	Precio (USD)	Caudal (Nm <sup>3</sup> /h)	Notas
Secador de hidrógeno Enapter DRY 2.1	Híbrido (Temperature/Pressure Swing Adsorption)	8.916	2.5 Nm <sup>3</sup> /h.	Secador cotizado por TRA (Chile) para Electrolizador Enapter el precio es puesto en el lugar del cliente.
Lectrodryer BAC-50	Adsorción regenerativa, doble torre	5.000 USD	≥ 100	Para flujos altos, funcionamiento continuo, presión hasta 10 bar.
LNH-20 (Hangzhou Linuo)	Adsorción contraflujo, torre desecante	5.000 USD	≥ 20	Capacidad a medida, adecuado para sistemas industriales.
Secador refrigerativo (Alibaba)	Refrigerativo	280-600 USD	0,5-10	Compacto, para pequeños flujos; punto de rocío ≈ 2 °C.
Molecular Sieve 13X - 25 kg (MoistureBoss)	Tamiz molecular, adsorbente	272 USD	Inline/modular	Fase final de purificación; pureza elevada.
Molecular Sieve 5A (Wisesorb) - 1.6 kg	Tamiz molecular, adsorbente	106 USD	Inline (caudales pequeños)	Final purificación, regenerable; punto de rocío muy bajo.

Para dichos secadores se utilizaron buscadores en internet. Para los cuales y para conocer los costos asociados a logística y transporte, se agregan en una nueva tabla. Se destaca en el análisis muestra que los costos logísticos y de importación para Chile varían significativamente según el tipo de equipo y el canal de compra. Para equipos industriales de mayor valor (≥ 5.000 USD), como los secadores de adsorción BAC-50 o LNH-20, los costos logísticos representan un 50% adicional sobre el valor CIF, resultando en un costo total razonable por unidad.

En contraste, para productos de bajo valor como tamices moleculares adquiridos por comercio electrónico (Amazon), el uso de transporte courier (DHL, FedEx) eleva desproporcionadamente el costo total, alcanzando entre 300% y 900% sobre el valor CIF, debido a mínimos fijos de aduana y costos de envío por volumen. Se recomienda en estos casos optar por importación consolidada marítima (LCL), que permite optimizar el costo por kilogramo y reducir el impacto logístico en el costo total del equipo.

A continuación, se presenta la *Tabla N°55* con un resumen sobre la fuente de costos y los costos asociados a logística y comercio exterior.

*Tabla N°55 Comparación de costos CIF y costos totales en Chile para secadores de hidrógeno, según fuente de adquisición y canal de importación.*

Marca / Modelo	Fuente	Valor CIF (USD)	Costo total puesto en Chile (USD)	% sobre CIF
Lectrodryer BAC-50	<a href="#">Lectrodryer BAC-50</a>	5.000	≈ 7.566	51 %
LNH-20 (Hangzhou Linuo)	<a href="#">Made-in-China / Linuo</a>	5.000	≈ 7.566	51 %
Secador refrigerativo (Alibaba) (600)	<a href="#">Alibaba</a>	600	≈ 1.576	163 %
Secador refrigerativo (Alibaba) (280)	<a href="#">Alibaba</a>	280	≈ 1.202	329 %
Molecular Sieve 13X - 25 kg	<a href="#">MoistureBoss, Amazon</a>	272	≈ 1.183	335 %
Molecular Sieve 5A - 1.6 kg	<a href="#">Wisesorb, Amazon</a>	106	≈ 1.093	933 %

A continuación, en la *Figura N°155* se presenta uno de los secadores identificados en las visitas a terreno realizadas para este estudio.



*Figura N°155 Secador para hidrógeno con capacidad de hasta 30 Nm<sup>3</sup>/h - Institución B.*

## 10.2.5 Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados

Dentro del estudio se han podido identificar distintas tecnologías de almacenamiento del hidrógeno, donde la tecnología más popular adoptada son los estanques construidos para hidrógeno. En el estudio, se destaca que ningún centro nacional e internacional contaba con algún otro tipo de almacenamiento. Profundizando, solo 1 centro desarrollado acumulaba hidrógeno de forma líquida para sus procesos, mientras que los 6 centros restantes que respondieron a la presencia de acumulación en sus procesos acumulaban de forma gaseosa el hidrógeno. Por lo tanto, el análisis de los costos se centrará basado en aquello.

Adicionalmente, el almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso a alta presión (350-700 bar) es la alternativa más adecuada para proyectos de I+D en Chile, tanto por requisitos normativos como por funcionalidad técnica. Según el Decreto N°13/2022, que regula instalaciones de hidrógeno, y las exigencias de la norma NFPA 2, los sistemas de gas comprimido permiten una implementación segura, fácilmente certificable por la SEC y adecuada para volúmenes moderados típicos de laboratorios (<5 kg H<sub>2</sub>). Además, los estanques de hidrógeno gaseoso presentan un CAPEX inicial reducido frente a alternativas criogénicas o geológicas. En términos de seguridad, el uso de tanques certificados ATEX, ventilación forzada y monitoreo continuo permite cumplir íntegramente con la normativa vigente, como lo demuestran los casos piloto impulsados por la Agencia SE y GIZ.

A continuación, se presenta la *Tabla N°56* de diversas alternativas de almacenamiento de hidrógeno en fase gaseosa, la cual fue elaborada por la empresa que redacta dicho estudio con fines del estudio. Además, se complementará la *Tabla N°56* con un caso de estudio de ejemplo en la importación de un estanque de hidrógeno con el fin de conocer los costos de logística y comercio exterior.

*Tabla N°56 Estanques de almacenamiento de hidrógeno gaseoso: comparación de capacidad, precio CIF y costo por kg de H<sub>2</sub> según proveedor y país de origen.*

Proveedor	Origen	Capacidad (kg H <sub>2</sub> )	Costo estimado CIF (USD)	Costo por kg H <sub>2</sub> (USD/kg)	Observación	Fuente
Pure Energy Hydrogen srl - (200 bar)	Italia	9,75 kg H <sub>2</sub>	6.140 USD	630 USD/kg	200 bar, tanque europeo	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA
Wuxi Daze CHG3-464-270-35 (350 bar)	China	7,95 kg H <sub>2</sub>	4.450 USD	560 USD/kg	Alta presión, 350 bar, entrega rápida	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA
Toyota Tsusho - (200 bar)	Corea del Sur	3,09 kg H <sub>2</sub>	4.500 USD	1.457 USD/kg	Tipo IV, 200 bar	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA
Hefei Sinopower - (350 bar)	China	4,35 kg H <sub>2</sub>	3.600 USD	827 USD/kg	Alta presión, 350 bar	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA
Shandong Zhongneng - (60 bar)	China	4,29 kg H <sub>2</sub>	7.442 USD	1.734 USD/kg	Baja presión, 60 bar	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA
Jiangsu Huayan - (50 bar)	China	4,21 kg H <sub>2</sub>	6.430 USD	1.527 USD/kg	Baja presión, 50 bar	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA
Hexagon - (300 bar)	Noruega / Alemania	~5 kg H <sub>2</sub> /cilindro	8.000-12.000 USD	1.600-2.400 USD/kg	Modular, común en GIZ/Agencia SE	GIZ / TRA
Mahytec 850 L / 60 bar	Francia	4,05 kg H <sub>2</sub>	10.000-15.000 USD	2.331 USD/kg	Tipo IV, estacionario para I+D	Elaboración propia según cotizaciones a QUEMPIN SpA

Carbotainer 5x50 L / 200 bar	España	0,47 kg H <sub>2</sub> (rack)	20.000-25.000 USD	42.553-53.191 USD/kg	Rack móvil, uso transporte	TRA
------------------------------	--------	-------------------------------	-------------------	----------------------	----------------------------	-----

Dentro del caso práctico se consideró el modelo Toyota Tsusho - (200 bar) de valor de 4.500 USD valor CIF. Se escoge dicho estanque debido a que se tienen todos los antecedentes para presentar los costos de logística y comercio exterior. Adicionalmente, dicha empresa presenta la documentación y pruebas reglamentarias que hacen posible la certificación de dicho estanque ante los organismos de fiscalización., como se muestra en la *Figura N°156*.



## SALES CONTRACT

Date : 28.May,2024  
Sales Contract No. : TSCM5-ACT-240528

To : QUEMPIN SPA  
Carlos Fernando 983  
Vina del Mar  
TEL. +56 9 9396 7635

From : TOYOTA TSUSHO KOREA CORPORATION  
Circular Economy Dept.1  
E-Mobility Supply Chain Group  
TEL. +82-2-6744-6808 FAX. +82-2-6744-6898

This Contract is made on the terms and conditions set forth hereunder and on the reverse hereof.

Terms of payment : T/T In Advance  
Price basis : CIF Valparaiso Port, Chile  
Date of delivery : ETD JUN 2024  
Loading port : Korean Port  
Remarks : Made in Korea

Description	Quantity	Unit Price	Amount	Remarks
Hydrogen Tank Type 4 (200Bar 190L)+Valve	1 EA	US\$ 4,500.00 /EA	US\$ 4,500.00	
<b>TOTAL</b>	<b>1 EA</b>		<b>US\$ 4,500.00</b>	

*Figura N°156 Contrato de compra de estanque de hidrógeno Toyota Tsusho - (200 bar)*

A partir de la *Figura N°157* se puede extraer del siguiente contrato que el transporte desde fábrica corresponde a (10% del Valor CIF). Una vez llegado el estanque a aduana se realiza los mismos trámites de importación, mediante un agente de aduana. En este caso los costos fueron los siguientes.



**PROVISION DE FONDOS**  
AG. DE ADUANA CARLOS P. ZULUETA G. Y CIA. LTDA.

Señor(es):  
**QUEMPIN SPA**  
**CARLOS FERNANDO 983**  
**76.772.215-K**

SANTIAGO; martes 30 julio 2024  
Atención a:

Presente  
Materia : SOLICITA PROVISION DE FONDOS Operación : IMPORT.CTDO.ANTIC.

Ref. : GOL2406024 Fecha B/L. : 27/06/2024 B/L : GOL2406024  
N° Manif. : 246059 Fecha : Aduana : VALPARAISO  
Nave : BUENOS AIRES EXPRESS Eta : 03/08/2024 T/C \$ : 947,78  
Fob us\$ : 4.254,90 Seguro us\$ : 85,10 Kilos Brt. : 120,00  
Flete us\$ : 160,00 Cif us\$ : 4.500,00 Valor : 4.500,00  
País : COREA DEL SUR País Adq. : COREA DEL Puerto Emb. : BUSAN CY (PUSAN)  
Fecha Vencimiento G.C.P.: 14/08/2024 Consignante : TOYOTA TSUSHO KOREA CORPORATION  
Mercadería : ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO; TOYOTA-F; ART. TIPO 4 / 200BAR \* 1  
Observacion :

Por medio de la presente solicito a Ud. la provisión de fondos para el despacho: **458292** (N° Dcl: 6530458292-2 ) según el siguiente detalle:

Concepto	Valor en us\$	Valor en \$
Iva Aduanero	855,00	810.352
<b>Total G.C.P.</b>	<b>855,00</b>	<b>810.352</b>
Honorarios Agencia	100,23	95.000
Gastos de Despacho	65,42	62.000
Flete Interno	110,79	105.000
Aforo	105,51	100.000
Desconsolidacion	216,29	205.000
Retiro Directo	311,25	295.000
IVA SERVICIOS		163.780
<b>Total Desembolsos</b>	<b>909,49</b>	<b>1.025.780</b>
<b>Total Prov.Fdos</b>	<b>1.937,30</b>	<b>1.836.132</b>

son: un millon ochocientos treinta y seis mil ciento treinta y dos

**Cheque a Tesorería:** TESORERIA GENERAL DE LA REPUBLICA por: 810.352

**Cheque a Agencia:** AG. DE ADUANA CARLOS P. ZULUETA G. Y CIA. LTDA. por: 1.025.780

\*Los valores solicitados en esta Provision de Fondos son estimativos. Los valores exactos seran los indicados en nuestra factura, los que pueden ser superiores o inferiores a esta Provision.  
Los gastos generados en PTA posteriores al pago de los tributos seran de exclusiva responsabilidad de los importadores\*

*Figura N°157 Desglose de costos por transporte y comercio exterior de estanque de hidrógeno Toyota Tsusho - (200 bar).*

Dentro de los costos no se encuentra los derechos de aduana, por el tratado de libre comercio con Corea del Sur, donde el procedimiento en presentar el Certificado de Origen (figura de dicho artefacto. Dicho documento exime del pago del derecho de aduana presentado. Luego el IVA aduanero (810.352 CLP≈800 USD) que es el 19% del Costo CIF. Adicionalmente, los gastos de despacho (62.000 CLP≈60 USD, 1% del costo CIF), gastos de aforo, desconsolidación y retiro directo (705.000 CLP≈700 USD, 16% Valor CIF) y honorarios de agencia (95.000 CLP≈90 USD, 2% del costo CIF).

A continuación, se presenta la *Tabla N°57* con un resumen de los costos de transporte y comercio exterior para caso de estudio ejemplo realizado para este estudio.

*Tabla N°57 Resumen de los costos de transporte y comercio exterior para caso de estudio ejemplo realizado para este estudio.*

Descripción	Valor (USD/CLP)	% sobre valor CIF
Valor CIF estanque Toyota Tsusho (200 bar)	4.500 USD	100%
Transporte desde fábrica	450 USD	10%
Derechos de aduana (exento por TLC Corea del Sur)	0 CLP	0%
IVA aduanero (19% sobre CIF)	800 USD	19%
Gastos de despacho	60 USD	1%
Gastos de aforo, desconsolidación y retiro directo	700 USD	16%
Honorarios de agencia de aduanas	100 USD	2%

El análisis de la depreciación en este caso es distinto a los anteriores, debido a que los estanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido constituyen un activo que debe ser estimado contable y tributariamente como "Instalaciones de almacenamiento tales como tank farms", con una vida útil tributaria normal de 15 años. Para efectos de este análisis económico, se considerará un estanque de hidrógeno con un valor de 4.500 USD, utilizado exclusivamente en instalaciones científicas y centros de I+D. Este valor es referencial y representa un caso práctico, con especificaciones técnicas aptas para el almacenamiento de hidrógeno a alta presión. La depreciación lineal en un periodo de 15 años, conforme al Artículo 31 N° 5 de la Ley sobre Impuesto a la Renta (LIR), se presenta a modo de ejemplo en la *Tabla N°58*.

*Tabla N°58 Ejemplo de depreciación económica anual de un estanque de hidrógeno comprimido utilizado en instalaciones de I+D, considerando una vida útil de 15 años.*

Año	Valor libro inicial [USD]	Depreciación Anual [USD]	Valor libro Final [USD]
1	4.500	300	4.200
2	4.200	300	3.900
...	...	...	...
15	300	300	0

Asimismo, esta categoría permite la aplicación de una depreciación acelerada en un período mínimo de 5 años, conforme al Artículo 31 N° 5 de la Ley sobre Impuesto a la Renta (LIR), tal como se muestra a modo de ejemplo en la *Tabla N°59*.

*Tabla N°59 Ejemplo de depreciación acelerada aplicada a un estanque de hidrógeno comprimido, considerando una vida útil tributaria de 5 años.*

Año	Valor libro inicial [USD]	Depreciación Anual [USD]	Valor libro Final [USD]
1	4.500	900	3.600
2	3.600	900	3.900
...	...	...	...
5	900	900	0

En un régimen tributario estándar, el estanque podría depreciarse mediante el método lineal durante un período de 15 años, lo que implica registrar un gasto deducible del 6,67% anual sobre su valor de adquisición. Este mecanismo es coherente con el enfoque conservador que utilizan muchas

instituciones públicas y académicas que operan bajo renta efectiva, y permite distribuir ordenadamente el impacto contable del activo en función de su vida útil fiscal.

Sin embargo, en el caso de que este estanque se instale en una zona extrema, como por ejemplo la Región de Magallanes, HUB de hidrógeno verde, explicado anteriormente, se recomienda optar por el mecanismo de depreciación acelerada, que permite deducir el valor del activo en un plazo de tan solo 5 años. Este tratamiento se justifica tanto desde la perspectiva técnica, dada la intensidad operativa y las condiciones ambientales exigentes, como desde el marco legal, ya que el artículo 31 N° 5 de la LIR otorga expresamente esta facultad en zonas geográficas que presentan desventajas estructurales para el desarrollo productivo.

La depreciación acelerada no solo permite reflejar de forma más precisa la pérdida de valor económico del activo en condiciones de uso intensivo, sino que también genera una ventaja tributaria significativa al permitir mayores deducciones en los primeros años del proyecto.

A continuación, en la *Tabla N°47* se presentan algunos contenedores para hidrógeno gaseoso identificados en las visitas a terreno realizadas para este estudio.



*Figura N°158 Estanques de almacenamiento identificados en visitas a terreno.*

En resumen, se recomienda que, en instalaciones ubicadas fuera de zonas extremas, se mantenga el tratamiento tributario estándar con una vida útil de 15 años. En cambio, para regiones como Magallanes, declaradas prioritarias para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, resulta conveniente acogerse a la depreciación acelerada de 5 años, aprovechando los beneficios que otorga la legislación tributaria vigente y maximizando la eficiencia financiera del proyecto.

## 10.2.6 Instrumentación de hidrógeno verde y derivados

La instrumentación del centro de investigación y desarrollo asociado al hidrógeno verde va asociado a procesos de control y análisis del hidrógeno, que tiene por objetivo entregar seguridad y certeza con respecto al uso del hidrógeno. Dentro del equipamiento principal del hidrógeno están los analizadores de gases, cromatografía, válvulas y flujómetros.

**Analizadores de gases:** Analizadores de gases portátiles y en línea, cromatógrafos de gases, analizadores de humedad en H2.

En primer lugar, se analizan los detectores de hidrógeno, instrumentos de relevancia para la seguridad de la acumulación y distribución de hidrógeno, asegurando hermeticidad y espacios libres de fuga al momento de operarlos. En Chile, existen varios proveedores importadores de este equipamiento y pueden encontrarse fácilmente en el mercado. Se hizo un levantamiento de distintos analizadores de gases los cuales se encuentran dentro de la *Tabla N°60*.

*Tabla N°60 Comparación de distintos analizadores de gases para hidrógeno disponibles en el mercado chileno, incluyendo marca, modelo, precio FOB, costos asociados a flete y aduana, y enlaces a los sitios web de los proveedores.*

Proveedor	Marca / Modelo	Precio FOB USD	Flete + Seguro + Aduana (USD)	% sobre CIF	Precio CIF estimado (USD)	Sitio web
Gaz Detect	ATEX OLC 100	1.471	260	15%	1.731	<a href="http://www.gazdetect.com">www.gazdetect.com</a>
IGD	TOC - 903 - X5	1.192	230	16%	1.422	<a href="https://www.internationalgasdetectors.com">https://www.internationalgasdetectors.com</a>
Detectores y Sensores.cl	No especificado	1.157	220	16%	1.377	<a href="https://www.detectores.cl">https://www.detectores.cl</a>
Grupo Almma	Macurco GD6	1.042	200	16%	1.242	<a href="https://grupoalmma.cl">https://grupoalmma.cl</a>
Cadmus	XBG-A1	813	190	19%	1.003	<a href="http://www.cadmus.co.uk">www.cadmus.co.uk</a>
ATO	GD300-H2	626	180	22%	806	<a href="http://www.ATO.com">www.ATO.com</a>
Henan Bosean Electronic Technology	Bosean KG60	351	150	30%	501	<a href="http://www.bosean.com">www.bosean.com</a>

**Válvulas de hidrógeno:** Para el uso seguro del hidrógeno como gas, se necesita utilizar válvulas reguladoras de presión, válvulas de seguridad, presostatos (switch de presión), dicho equipamiento es clave para realizar un circuito de distribución de hidrógeno en estado gaseoso. Los valores dependerán del caudal y presión a manejar. Para la

*Tabla N°61*, se consultó dentro del mercado para el contar con valores asociados a los estos 3 tipos de válvulas, para caudales medios-bajos, con el fin de construir una plata semi industrial de producción y uso de hidrógeno, tal como los centros de investigación encuestados trabajan.

*Tabla N°61 Tabla resumen de válvulas, sensores e interruptores utilizados en circuitos de distribución de hidrógeno gaseoso, incluyendo origen, descripción técnica, valores estimados en comercio exterior y certificaciones requeridas para su uso seguro en sistemas semi-industriales.*

Categoría	Marca / Modelo	Origen	Descripción técnica	Valor (€/£ / USD)	Certificados	Costo comercio ext. (estimado)
Válvulas reguladoras de presión	Pietro Fiorentini / Dival 500 H	Italia	Regulador gas presión media/baja, Fail Open, para 100% H2, clase CE, EN 334, PED	950 USD	PED-CE, EN 334	~15% CIF (flete + seguro)
	Pietro Fiorentini / STAFLUX 187	Italia	Regulador DN 1", ANSI1500, para 100% H2	24.500 USD	Certificado tipo 04B	~15% CIF
Válvulas de seguridad / alivio	Herose / 06011 (PN63, 1/4" NPT)	Alemania	Safety valve, INOX, 5-55 bar, -255 a +65°C, aprobada H2, LNG	210 USD	TÜV-SV.1048 S/G/L	~15% CIF
	VS/AM 58 1" NPT / VS/AM 65 BP 1"x1"	No especificado (EU)	Válvula seguridad 100% H2	2.100 USD/560 USD	CE	~15% CIF
Sensores de presión / interruptores	Hydrotechnik / D_SH2 DS5	UK	Pressure switch H2, PNP NO, 250 bar, EC79/EC406	320 USD	EC79/EC406	~20% CIF
	SUCO / 0H87-46041-2-080	USA	Piston pressure switch, 50-200 bar, SPDT, G1/4", preset 200 bar, INOX 316L	64 USD	-	~20% CIF
Sensores de detección de H2	IGD / TOC-903-X5 + TOC-102-VHH2	UK	Transmisor ATEX display + sensor H2 0-40,000 ppm, relays, IP66, zona 1/2, 2-wire, CE, ATEX	1.500 USD	ATEX, IECEX, UKCA	~20% CIF
	IGD / TOC-903-X5 + TOC-102-MK8	UK	Detector gas inflamable (calibrado a H2), 0-100% LEL, display + sensor	1.380 USD	ATEX, IECEX, UKCA	~20% CIF

**Controladores de flujo másico:** El control del caudal de hidrógeno en estado gaseoso requiere el uso de controladores de flujo másico, fundamentales para regular de manera precisa los procesos de producción y consumo. Los costos de estos equipos varían según el rango de operación y las condiciones de uso. La *Tabla N°62* se presenta los valores de referencia obtenidos en el mercado para aplicaciones de caudal medio-bajo, en contextos de plantas semi-industriales, similares a las utilizadas en centros de investigación consultados.

*Tabla N°62 Comparativa de controladores de flujo másico para hidrógeno en estado gaseoso, incluyendo tipo de instrumento, rango de flujo, precios aproximados, origen y fuente de la información técnica o comercial.*

Marca / Modelo	Tipo	Rango de flujo H2	Precio aproximado (USD)	Origen Proveedor	Fuente del precio
Obinu / DN50	Flujómetro	DN50 (sin dato m³/h)	~ 2.326	Obinu y CIA LTDA	Precio proporcionado por usuario
Genera Industrial	Flujómetro	(sin dato)	~ 1.427	Genera Industrial	Precio proporcionado por usuario
Swagelok VAF-M4-1-1-8568-0	Flujómetro rotámetro	5-50 m³/h	~ 1.375	Swagelok ALTE	Catálogo Swagelok Variable Area Flowmeters
Bronkhorst F-201CV-2K0-PGD-88-V (EL-FLOW)	MFC digital térmico	hasta 2000 sccm	~ 960	Bronkhorst High-Tech B.V.	Cotización europea de distribuidor
Bronkhorst MV-396-H2	Flujómetro bypass OLED	0,2-100 ln/min	~ 892	Bronkhorst High-Tech B.V.	Cotización mercado nuevo
Bronkhorst MV-391-H2	Flujómetro bypass OLED	20-200 sccm	~ 892	Bronkhorst High-Tech B.V.	Cotización mercado nuevo

**Cromatógrafo:** Para el análisis seguro y preciso del hidrógeno como gas, es necesario utilizar cromatógrafos especializados que permitan determinar la pureza, composición y posibles contaminantes en las corrientes de hidrógeno. Este equipamiento es clave para garantizar la calidad del hidrógeno en aplicaciones industriales, energéticas y de investigación. Los valores de inversión dependerán de la sensibilidad requerida, tipo de detección y capacidades analíticas. Para la siguiente tabla, se consultó al mercado para obtener valores asociados a cromatógrafos aptos para caudales medios-bajos, orientados a la construcción de plantas semi-industriales de producción y uso de hidrógeno, en línea con las prácticas observadas en centros de investigación encuestados.

Dentro del estudio se pudo identificar el uso de cromatógrafos a solo 1 centro de investigación y desarrollo, el cual utiliza un cromatógrafo de gases acoplado a detector de conductividad térmica (GC-TCD) marca Perkin Elmer modelo Clarus 500, adquirido el 2017. Dicha marca es representada en Chile por la empresa PERKIN ELMER CHILE LIMITADA, la cual importa los equipos para su distribución.

Consultando al mercado, se pudo constatar que en el presente existen modelos más modernos y efectivos. Se pudo obtener el valor cromatógrafo de gases marca Perkin Elmer modelo Clarus 590 (DDP) por 66.000 USD más IVA. Es decir, un precio con impuestos incluidos de 81.000 USD [52] . Complementando la información, el valor de un diagnóstico por la misma empresa para un cromatógrafo marca Perkin Elmer modelo Clarus 590 puede costar 420 USD [53], es decir solo la evaluación de la falla por personal autorizado y competente. Luego una mantención preventiva de un según un contrato anual de 12 meses, elaborado por la misma empresa representante tiene un valor de 2.000 USD. [54] Para la mantención correctiva tiene un costo, que dependerá de la reparación a realizar. Según los costos levantados para este estudio, una reparación para un cromatógrafo por la misma empresa distribuidora con personal autorizado cobro 2600 USD [55] y 7.250 USD [56] ambos IVA incluido. Dentro de la *Tabla N°63* se presenta un resumen de los costos asociados a la adquisición, mantenimiento preventivo, diagnóstico técnico y reparaciones correctivas de un cromatógrafo GC-TCD utilizado para el análisis de hidrógeno gaseoso

*Tabla N°63 Costos referenciales asociados a la adquisición, mantenimiento y reparación de un cromatógrafo GC-TCD para análisis de hidrógeno, incluyendo desglose porcentual respecto al valor del equipo.*

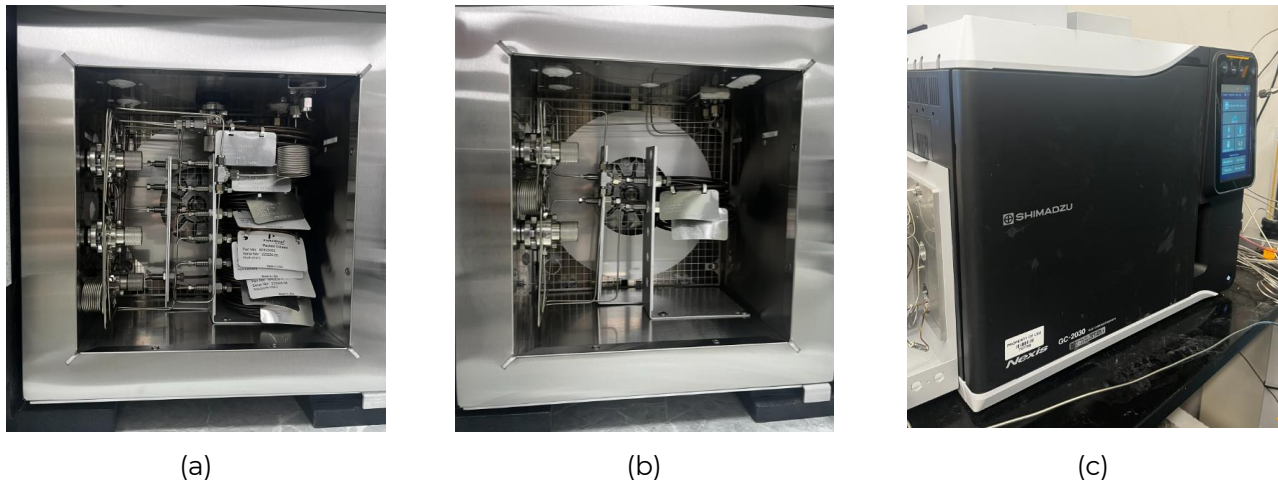
Ítem	Descripción	Valor USD (sin IVA)	Valor USD (con IVA)	% sobre valor equipo
<b>Adquisición del equipo</b>	Cromatógrafo GC-TCD Clarus 590 (DDP)	66.000	81.000	100,0 %
<b>Diagnóstico técnico de fallas</b>	Evaluación de falla por personal autorizado	360	420	0,52 %
<b>Mantención preventiva</b>	Revisión y limpieza de componentes que puedan provocar fallas	1.700	2.000	2,51%
<b>Mantención correctiva (caso 1)</b>	Reparación menor (ejemplo de intervención)	2.170	2.600	3,19 %
<b>Mantención correctiva (caso 2)</b>	Reparación mayor (según falla crítica)	6.000	7.250	8,95 %

Realizando el análisis de depreciación de este mismo equipo podemos decir, desde el punto de vista tributario, este tipo de equipamiento debe ser clasificado como instrumentos de precisión o equipos de laboratorio, conforme a la Tabla de Vida Útil del Activo Inmovilizado publicada por el Servicio de Impuestos Internos (SII). Según esta tabla, dichos bienes tienen asignada una vida útil tributaria de 10 años, por lo cual se debe aplicar una depreciación lineal del 10% anual, equivalente a 8.000 USD por

año. Este valor se registra como gasto deducible para efectos de la determinación del impuesto a la renta, según lo dispuesto por el artículo 31 N°5 de la Ley sobre Impuesto a la Renta (LIR).

No obstante, si el cromatógrafo fuese instalado en una zona geográfica con régimen tributario especial, como la Región de Magallanes o territorios catalogados como zonas extremas, o bien si forma parte de un proyecto de innovación tecnológica financiado parcialmente por fondos públicos, es posible aplicar la modalidad de depreciación acelerada, también contemplada en el mismo cuerpo legal. Esta opción permite distribuir el valor del activo en un período reducido de 4 años, generando una deducción anual de 2.000 USD, lo que representa una optimización contable significativa, especialmente para proyectos de corta duración o con alta intensidad en uso de capital fijo.

A continuación, en la *Figura N°159* se presentan cromatógrafos identificados en las visitas a terreno realizadas para este estudio.



*Figura N°159 (a) y (b) Vistas de cromatógrafos abiertos identificados en visita a laboratorio de control de calidad de institución O (Chile); (c) Cromatógrafo utilizado en laboratorio en Institución INT-3.*

## 10.2.7 Producción de derivados de hidrógeno verde

Dentro del estudio se han identificado diversas tecnologías asociadas a la producción de derivados de hidrógeno verde, tales como metanol, amoníaco y combustibles sintéticos. Si bien estas tecnologías son variadas, el reactor químico constituye el equipo central para llevar a cabo estas transformaciones. En el análisis realizado, se observó que solo una institución nacional contaba con equipamiento activo para producción de derivados, mientras que, en el caso internacional, tres centros de I+D+i declararon contar con reactores operativos y con proyectos en curso enfocados en síntesis de derivados. Por lo tanto, el análisis de costos se centrará en reactores químicos a escala piloto para síntesis de amoníaco, que son los más recurrentes en el levantamiento, y los cuales cuentan con mayor bibliografía que respalda la estructura de costos de este tipo de equipos.

La elección de un reactor para proyectos de I+D+i debe considerar su versatilidad experimental, la posibilidad de operar en régimen discontinuo o continuo, y su capacidad para simular condiciones industriales en entorno controlado. En el caso del amoníaco, las condiciones típicas de operación son entre 100 y 400 bar y temperaturas que rondan los 400 a 650 °C [57], requiriendo materiales de construcción avanzados y sistemas de seguridad reforzados, específicamente para escalas pequeñas o no industriales, se sugiere trabajar en presiones de entre 100 y 200 bar y temperaturas entre 350 y 525 °C [58].

A continuación, se presenta la *Tabla N°64* con ejemplos de configuraciones de reactores piloto para producción de amoníaco, incluyendo rangos estimativos de CAPEX basados en literatura especializada, estudios internacionales recientes y cotizaciones reales de equipos de “microescala” o escala de laboratorio. Esta tabla se complementa con un caso de estudio simulado de importación de un reactor piloto para síntesis de amoníaco, que permite estimar los costos asociados a la adquisición, logística y puesta en marcha de este tipo de tecnología en un centro chileno de I+D+i.

*Tabla N°64 Ejemplos de configuraciones de reactores piloto para la síntesis de amoníaco, incluyendo capacidad de producción anual, costos estimados y observaciones técnicas.*

Proveedor	Origen	Producción de derivados (Toneladas por año)	Costo aproximado (USD)	Costo aproximado por kg de amoníaco producido (USD)	Observación	Fuente
KAPSOM Green Energy Technology Limited	China	100 TPA	1.800.000-2.100.000 USD	18-21 USD/kg NH <sub>3</sub>	Reactor de síntesis de amoníaco de tipo demostrativo	Cotización a proveedor
Xiamen Ollital Technology Co. Ltd	China	3,6 TPA	39.700 USD	10,9 USD/kg NH <sub>3</sub>	Reactor de síntesis de amoníaco para laboratorio	Cotización a proveedor
Shanghai Hydrogen Propulsion Technology Co.	China	3,6 TPA (estimado)	34.000 USD	9,4 USD/kg NH <sub>3</sub> (estimado)	Reactor de síntesis de amoníaco para laboratorio	Encuesta del estudio

En la *Figura N°160*, se muestran dos tipos de reactores considerados en la evaluación de costos para la producción de derivados del hidrógeno verde. La imagen (a) corresponde a un reactor de síntesis de amoníaco con capacidad de 100 ton/año, que destaca por su complejidad y por reproducir

condiciones más cercanas a las de la industria. Este equipo permite ajustar parámetros clave como temperatura, presión, tipo de catalizador, y validar procesos a escala semiindustrial. En contraste, la figura (b) ilustra un reactor de menor escala (< 10 ton/año), útil para actividades de investigación y desarrollo, pero que no alcanza las exigencias de operación continuada ni la flexibilidad experimental del reactor (a), por lo que contar con al menos un equipo de características semiindustriales resulta esencial para avanzar en proyectos de I+D+i y garantizar la transferencia tecnológica.



(a) KAPSOM - 100 TPA



(b) OLLITAL - 3,6 TPA

*Figura N°160 Reactores para producción de amoníaco en contextos de I+D+i. (a) Reactor de proyecto demostrativo con capacidad de 100 TPA. (b) Reactor escala laboratorio con capacidad de 3,6 TPA. Fotografías proporcionadas por proveedores.*

Equipamiento como el que se muestra en la *Figura N°161*, no solo facilita la investigación, el desarrollo y la innovación en la producción de derivados de hidrógeno verde, sino que también es fundamental para la formación de personal en el control, el monitoreo y la optimización de estos procesos. Un ejemplo destacado es la experiencia de Institución INT-5, que incorporó reactores de características similares en sus programas formativos con una inversión aproximada de 1.000.000 USD en su reactor de etanol (ver *Figura N°161*) y aproximadamente 5.000.000 USD para el laboratorio completo (incluido el reactor), permitiendo que estudiantes de pregrado y profesores de investigación aplicada, con grado de doctorado, adquirieran competencias prácticas en manejo de parámetros de operación, evaluación de catalizadores y aseguramiento de la calidad en condiciones reales de laboratorio, permitiendo además, la realización de investigaciones en contextos similares a los presentes en la industria.



*Figura N°161 Reactor para producción de etanol con fines formativos (departamento de ingeniería química), identificado en visita a terreno en Institución INT-5.*

Teniendo en cuenta los datos de la *Tabla N°65*, se observa que los costos de importación, incluyendo el IVA aduanero y los gastos generales asociados, pueden representar entre un 30 % y un 40 % adicional sobre el precio CIF del equipo importado.

*Tabla N°65 Desglose de costos estimados asociados a la importación de un reactor de amoníaco, incluyendo flete, seguro, aranceles, IVA aduanero, y gastos logísticos relacionados al ingreso del equipo en Chile.*

Descripción	Valor (USD)	% sobre valor CIF
Costo del reactor de amoníaco	1.724.600	86.23%
Costo de envío	273.400	13.67 %
Seguro	2.000	0.10 %
Valor CIF total	2.000.000	100%
Derechos de aduana (pueden ser eximidos por DS 100/2012 o TLC)	120.000	6%
IVA aduanero (19 % sobre CIF)	380.000	19%
Gastos de despacho	14.000	0.70 %
Gastos de almacenaje	180.000	9%
Honorarios de agencia de aduanas	20.000	1%
Desconsolidación, manifiesto, manejo, corrección BL	65.800	3.29 %

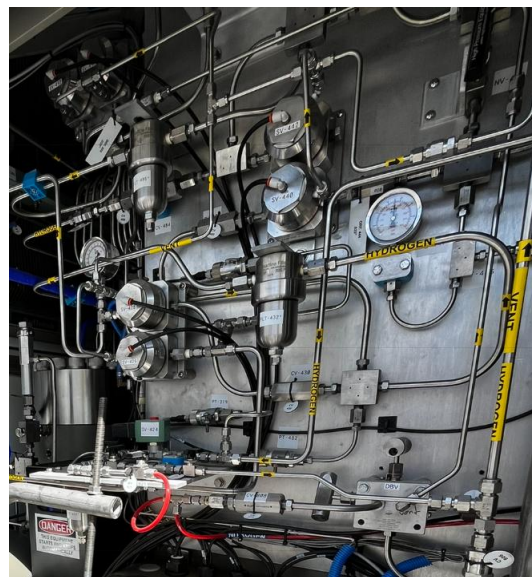
En conclusión, la disponibilidad de reactores químicos de características semiindustriales es esencial para cerrar la brecha entre investigación de laboratorio y transferencia tecnológica en derivados de hidrógeno verde. La inversión en unidades piloto bien dimensionadas, junto con un análisis riguroso de costos logísticos y regulatorios, permitirá optimizar parámetros de operación, formar capital humano especializado y desarrollar procesos escalables con perspectivas de viabilidad económica.

## 10.2.8 Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados

El transporte y distribución de hidrógeno verde y sus derivados constituye una etapa estratégica para el desarrollo de proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Esta fase no solo permite trasladar el hidrógeno desde el punto de producción hasta los equipos de ensayo o consumo final, sino también validar tecnologías de almacenamiento móvil, sistemas de transferencia, trazabilidad y monitoreo de posibles emisiones o fugas bajo condiciones experimentales. En este tipo de bancos de pruebas, el equipamiento debe ser versátil para adaptarse a diversos formatos energéticos, hidrógeno comprimido, líquido o combinado en derivados como amoníaco, e-metanol o combustibles sintéticos, y asegurar la compatibilidad de materiales y componentes frente a entornos industriales reales.

Por ello, la infraestructura asociada al transporte y distribución en I+D+i incorpora cilindros de alta presión, contenedores criogénicos, sistemas de tuberías instrumentadas, estaciones de carga y transferencia, y equipos de seguridad para inertización y respuesta ante emergencias. Además, se incluyen sistemas de blending y tramos de tuberías con instrumentación avanzada, que permitan estudiar fenómenos de mezcla, estabilidad y dispersión del hidrógeno en redes. A continuación, se presentan distintos equipos presentes en las definiciones asociadas a la tipología de distribución y transporte

**Sistemas de cañerías y distribución interna de hidrógeno:** En instalaciones piloto o de I+D+i, las cañerías para distribución interna de hidrógeno gaseoso cumplen un rol clave al transportar el gas desde los puntos de almacenamiento o generación hacia los equipos de ensayo o consumo, garantizando un suministro seguro y estable. Dado el carácter altamente difusivo e inflamable del hidrógeno, es fundamental seleccionar materiales y componentes certificados, como tuberías de acero inoxidable o compuestos aprobados, junto con sistemas de detección de fugas y ventilación apropiada. En la *Figura N°162* se muestra a modo de ejemplo un sistema de distribución interna de hidrógeno, compuesto por tuberías de acero inoxidable, válvulas e instrumentación.



*Figura N°162 Sistema de distribución de hidrógeno, identificado en visita a terreno en Institución INT-1.*

Esta subcategoría ofrece una estimación de costos para el diseño de redes internas de distribución de hidrógeno, basándose en referencias de proyectos piloto reales como los mencionados de Antofagasta, Magallanes y el caso propio de la consultora en la fabricación de plantas con distribución de hidrógeno al interior de instalaciones. Dado que estos sistemas incluyen múltiples componentes, la aproximación se expresa como porcentajes del costo total de inversión del sistema de distribución completo. En la *Tabla N°66* se muestran algunos proveedores de equipamiento para sistemas de cañerías y distribución interna de hidrógeno, que fueron utilizados para la estimación de costos posterior.

*Tabla N°66: Proveedores y fabricantes de componentes de con compatibilidad para sistemas de hidrógeno.*

Proveedor/Fabricante	Tipo	Origen de la marca	Productos	Referencia
Danus Conexiones SPA	Proveedor local	Chile	Cañerías, válvulas, instrumentación, mangueras, otros.	<a href="#">web</a>
D-Lok	Fabricante	Corea del Sur	Cañerías, válvulas, conexiones, otros.	<a href="#">web</a>
Swagelok	Fabricante	EE.UU.	Válvulas, válvulas, reguladores de presión, instrumentación, mangueras, otros.	<a href="#">web</a>
WIKA Chile s.p.a.	Fabricante	España	Instrumentation.	<a href="#">web</a>
Pietro Fiorentini s.p.a.	Fabricante	Italia	Válvulas, reguladores de presión, instrumentación, otros.	<a href="#">web</a>
HyLok	Fabricante	Corea del Sur	Cañerías, válvulas, instrumentación, mangueras, otros.	<a href="#">web</a>
Aceros Otero - Otero y Domínguez Ltda.	Proveedor local	Chile	Cañerías, conexiones, otros.	<a href="#">web</a>

Considerando los rangos de precios identificados en los proveedores mostrados en la tabla anterior, se generó la *Tabla N°67*.

*Tabla N°67: Distribución de costos asociada a cada conjunto de componentes de un sistema básico de distribución interna de hidrógeno gaseoso.*

Componente	Participación aproximada sobre el total del sistema de distribución
Válvulas	30 - 35%
Reguladores de presión	25 - 30%
Tuberías y conexiones	15 - 25%
Instrumentación de monitoreo y drenajes	10 - 20%
Otros componentes complementarios	3 - 5%

Es importante destacar que la distribución de costos asociadas a los componentes de un sistema de estas características puede variar enormemente de un caso a otro y la proporción con la que varían los costos dependerá en gran medida del diseño de la planta, por lo que esta tabla debe considerarse sólo como una referencia para instalaciones que cuentan con distribución al interior de un solo recinto.

**Sistema de mezcla en blending:**

Dentro del estudio se pudo identificar solo a dos centros de investigación y desarrollo con estación de blending. La primera estación de blending y la más formal, corresponde a la unidad de generación e inyección de hidrógeno para una red de gas natural. Para ello, se construyó un sitio con radier, soportes, sistema de conexión eléctrico y de señales para distintas válvulas, instrumentos de medición análogos y digitales, sensores y actuadores para llevar a cabo el proceso de inyección de hidrógeno a gas natural. La estación fue desarrollada por la empresa Pietro Fiorentini SpA, empresa italiana proveedora de válvulas de gas combustible. La estación consiste en 3 secciones.: Hidrógeno a Alta Presión (40 barg), Hidrógeno a baja presión (1.6barg) y Sección de Blending, Gas Natural e Hidrógeno (4,0 barg). Dicho sistema no tuvimos una evaluación formal del costo, debido a que fue un trabajo encargado por la empresa UTIS - Ultimate Technology to Industrial Savings - que es una joint venture portuguesa entre ULTIMATE CELL y SEMAPA. Lo cual hizo difícil conseguir el dato cuantitativo. Sin embargo, en entrevista con la Institución B (*Figura N°163*), se pudo avaluar la solución llave en mano en un monto de 1.000.000 USD.



*Figura N°163 Sistema de blending utilizado y diseñado por la empresa Institución B para mezclar hidrógeno con gas natural e inyectarlo a la red*

## 10.2.9 Consumo de hidrógeno y derivados para generación de calor o combustión

### Quemadores para la combustión:

La generación de calor con hidrógeno se realiza mediante quemadores especialmente diseñados, cuyos gases calientes pueden alimentar hornos, calderas y cámaras térmicas. Para cumplir con la normativa de seguridad en el encendido, la operación y la finalización de cualquier proceso de combustión, estos quemadores deben contar con sistemas de control automático. Por ello, en este análisis se evaluarán los costos asociados a los quemadores de hidrógeno, su automatización, las válvulas de regulación y los gastos de importación y comercio exterior de este tipo de equipamiento. En la *Tabla N°68* se presentan los costos de importación y especificaciones técnicas de quemadores de hidrógeno modulantes utilizados para la generación de calor en procesos de combustión controlada.

*Tabla N°68 Costos unitarios de quemadores de hidrógeno modulantes para generación de calor, incluyendo descripción técnica, valores EXW y estimación de gastos CIF para importación en Valparaíso, Chile.*

Ítem	Marca / Proveedor	Modelo	Descripción Técnica	Costo Unitario EXW (USD)	Gastos CIF Valparaíso (USD)
Quemador de hidrógeno modulante	Energía y Medioambiente Combustión, S.L.	JBD-30 H2	Quemador de H <sub>2</sub> 30kW + cuadro eléctrico	9.900	780 (7.8%)
Quemador de hidrógeno modulante	Energía y Medioambiente Combustión, S.L.	JBD-60 H2 M	Quemador de H <sub>2</sub> 60kW + cuadro eléctrico	11.500	1.250 (10,95%)

Para el caso práctico de la importación y los comercios exterior se tomó el caso práctico del Quemador JBD-60 H2 M. Para ello, dentro de la *Tabla N°69* se publican los valores del impuesto a pagar, costos de manejo de la importación entregado por el courier, en este caso UPS. Que entrego el pallet directamente en el lugar del cliente es decir un incoterm DDP.

*Tabla N°69 Caso práctico de importación bajo Incoterm DDP para un quemador de hidrógeno modulante modelo JBD-60 H2 M, incluyendo desglose de costos asociados a IVA, despacho y porcentaje adicional sobre el valor unitario.*

Ítem (origen)	Marca Modelo	Costo Unitario (EUR)	IVA 19% (CLP)	Derecho Aduaneros	Costo de importación USD	% importación sobre Unitario
Quemador de hidrógeno modulante (España)	JBD-60 H2 M	11.500	1.900	0%	880	8,77%

Para el uso de estos quemadores se analizó tanto el valor de hidrógeno verde e hidrógeno gris, con el que el lector pueda sacar conclusiones sobre el uso de cada hidrógeno. Además, se realizó una comparación con un Gas Combustible, para tener una perspectiva del uso del hidrógeno como combustible para este caso en particular.

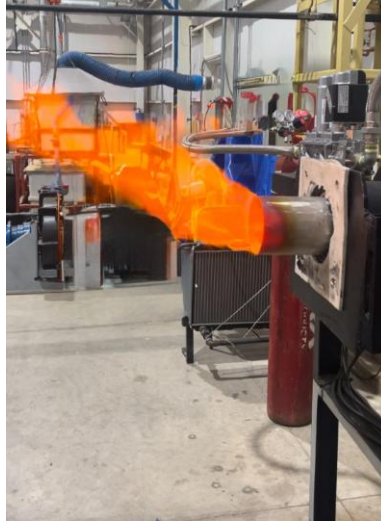
Un cilindro de GLP de 45kg tiene un valor promedio entre 75.000 y 100.000 CLP, y uno de hidrógeno de 7, 5m<sup>3</sup> (600g de H<sub>2</sub> aprox.) a 150 bar nuevo, tiene un valor de 400.000 CLP con un valor de recarga de 130.000 CLP aproximadamente. Como actualmente no hay un comercio de cilindros de hidrógeno verde, los cotizados son hidrógeno gris. Para determinar el valor de un cilindro de hidrógeno verde se usaron los precios de costo de producir hidrógeno gris y verde actualmente y se hizo una ponderación entre estos dos valores. El hidrógeno gris actual vale tiene un costo de producción de 2 USD/kg y en Chile el hidrógeno verde varía entre 4 a 5,5 USD/kg, Según la referencia [34] el costo del hidrógeno verde es de 3,88 USD/kg lo cual está dentro del rango analizado. Un cilindro de GLP de 45kg tiene un valor promedio entre 75.000 y 100.000 CLP, y uno de hidrógeno de 7, 5m<sup>3</sup> (600g de H<sub>2</sub> aprox.) a 150 bar nuevo, tiene un valor de 400.000 CLP con un valor de recarga de 130.000 CLP aproximadamente. Como actualmente no hay un comercio de cilindros de hidrógeno verde, los cotizados son hidrógeno gris. Para determinar el valor de un cilindro de hidrógeno verde se usaron los precios de costo de producir hidrógeno gris y verde actualmente y se hizo una ponderación entre estos dos valores. El hidrógeno gris actual vale tiene un costo de producción de 2 USD/kg [34] y en Chile el hidrógeno verde varía entre 4 a 5,5 USD/kg, Según la referencia [34] el costo del hidrógeno verde es de 3,88 USD/kg lo cual está dentro del rango analizado, lo cual es un 194% respecto al valor del precio del hidrógeno gris.

Luego, teniendo estos valores de precios y la cantidad de masa que posee cada cilindro se puede tener un valor de CLP/kg de cada combustible. Con todo esto se puede comparar el costo operacional de un quemador a 60kW respecto al costo de sus combustibles dentro de la *Tabla N°70*.

*Tabla N°70 Comparación de costos por kilogramo de GLP, hidrógeno gris e hidrógeno verde para uso en quemadores.*

Combustible	Capacidad cilindro	Costo recarga (CLP)	Masa útil por cilindro	Costo CLP/kg	Observación
GLP	45 kg	75.000 - 100.000	45 kg	1.667 - 2.222	Precio promedio por cilindro de 45 kg
H <sub>2</sub> gris	600 g (≈ 0,6 kg)	130.000	0,6 kg	216.667	Recarga de cilindro a 150 bar, 7,5 m <sup>3</sup> aprox.
H <sub>2</sub> verde	600 g (≈ 0,6 kg)	252.200 (ajuste x 194%)	0,6 kg	420.333	Ajustado por diferencial de costos de producción (verde vs gris)

A continuación, en la *Figura N°164* se presenta un quemador de 100% hidrógeno identificado en las visitas a terreno realizadas para este estudio.



*Figura N°164 Quemador 100% hidrógeno utilizado por Institución N para actividades de I+D+i.*

**Sistema de mezcla en blending:** Tal como se expuso en detalle en la sección anterior, se identificó la existencia de dos centros de investigación y desarrollo con estaciones de blending de hidrógeno y gas natural. En particular, se describió la unidad de generación e inyección de hidrógeno desarrollada por la empresa Pietro Fiorentini SpA, que integra infraestructura con radier, soportes, sistemas eléctricos y de señales, junto a instrumentación análoga y digital para gestionar válvulas, sensores y actuadores durante el proceso de mezcla. La estación opera con tres secciones diferenciadas según presión: hidrógeno a alta presión (40 barg), hidrógeno a baja presión (1,6 barg) y la sección de blending a 4 barg. Aunque no se obtuvo un desglose detallado de costos por componentes, la solución completa fue estimada en entrevista con la Institución B en aproximadamente 1.000.000 USD para su implementación llave en mano.

**Motores de combustión interna:** Existen diversas empresas que están desarrollando motores de combustión interna que utilicen hidrogeno como combustible. Algunas de ellas son: Yanmar Power Technology Co., Ltd. (YPT) [59], la Join Venture BeHydro entre Anglo Belgian Corporation y CMB.TECH [60] y JCB [61].

La empresa con antecedentes con respecto a los costos de estos motores de combustión interna es muy escasa. Para el caso de BeHydro, director de área de desarrollo, Víctor Gutiérrez de Anglo Belgian Corporation declara que un grupo electrógeno tiene como 500-600 euros por kilowatt instalado [62]. El costo considera un motor de combustión interna para el movimiento de un generador que funciona con 85% de hidrogeno y 15% LNG de unos 600kW. Es decir, el costo de este equipo tiene un valor de 360.000 euros.

## 10.2.10 Consumo de hidrógeno y derivados para generación de electricidad

Dentro del estudio se han identificado múltiples alternativas tecnológicas para el uso de hidrógeno verde y sus derivados. Una de las más relevantes en su aplicación como uso final es la generación de electricidad, donde destacan las celdas de combustible en proyectos de investigación, desarrollo e innovación. Esta tecnología permite validar aplicaciones estacionarias como móviles en condiciones controladas, y se presentan como una de las vías más prometedoras para demostrar el potencial del hidrógeno como vector energético limpio.

A partir del levantamiento realizado, se constató que un número reducido de centros nacionales cuenta actualmente con celdas de combustible operativas destinadas a I+D+i, mientras que, a nivel internacional su uso es más extendido, especialmente en instituciones que desarrollan proyectos aplicados en movilidad eléctrica, respaldo energético y microrredes. Esta diferencia pone de manifiesto la necesidad de fomentar la incorporación de este tipo de equipamiento en Chile, tanto para validar sistemas eléctricos como para la formación de capacidades técnicas. A continuación, se presentan en la *Figura N°165* algunas celdas de combustible utilizadas en los centros de I+D+i visitadas para el desarrollo de este estudio.



(a)

(b)

(c)

*Figura N°165(a) Celda de combustible PEM interior de automóvil Toyota Mirai, Institución R (Chile); (b) Celda de combustible PEM para alimentar eléctricamente sala de computación universitaria en Institución INT-1; (c) Celda de combustible PEM para generación eléctrica para casa piloto alimentada en base a hidrógeno Institución INT-3.*

Según estudios recientes, se proyecta un crecimiento sostenido en el uso de pilas de combustible durante los próximos años, impulsado por la necesidad global de reducir emisiones y avanzar hacia una matriz energética más limpia. Entre las tecnologías más utilizadas en el mercado actual se encuentran las pilas de membrana de intercambio de protones (PEMFC), las pilas de ácido fosfórico (PAFC), las pilas de carbonato fundido (MCFC) y las pilas de óxido sólido (SOFC), junto con otros tipos específicos según la aplicación. Entre ellas, dos tecnologías lideran actualmente el mercado:

Pilas de combustible de baja temperatura, especialmente las PEMFC, son ampliamente utilizadas en la movilidad, incluyendo automóviles, camiones y autobuses. El hidrógeno es el combustible más limpio, ya que emite vapor de agua por el tubo de escape de los vehículos en lugar de gases tóxicos.

Pilas de combustible de alta temperatura, como las SOFC, se emplean principalmente en aplicaciones estacionarias. Actualmente, se emplean para energía de emergencia y de respaldo, y su uso en otras aplicaciones según estudios internacionales se extenderá a otras áreas [63].

En ambos casos, el diseño del sistema debe considerar componentes complementarios como reformadores, inversores, sistemas de acondicionamiento de aire y agua, sistemas de protección y almacenamiento eléctrico, especialmente en los modelos SOFC debido a las altas temperaturas los requerimientos suelen ser mayores. Además, el cumplimiento de las normas de seguridad eléctrica y de hidrógeno, así como la posibilidad de monitorear variables clave en tiempo real, son factores esenciales para su operación en entornos de investigación.

Dado lo anterior, el análisis de costos se centrará en celdas de combustible tipo PEM y SOFC a escala de laboratorio o planta piloto. Según estudios recientes, las potencias nominales utilizadas en laboratorios, bancos de prueba y plantas piloto suelen estar en el rango de 1 a 10 kW, por lo que este será el intervalo seleccionado para el presente estudio [64].

A continuación, se presenta la *Tabla N°71*, con precios de referencia para celdas de combustible de baja potencia utilizadas en investigación, incluyendo estimaciones de CAPEX derivadas de literatura técnica, catálogos comerciales y cotizaciones reales obtenidas por Institución N.

*Tabla N°71 Precios de referencia para celdas de combustible tipo PEM de baja potencia utilizadas en investigación, incluyendo modelos de diferentes países y costos finales estimados con IVA incluido.*

Ítem tecnología	Marca Proveedor	País	Enlace	Modelo	Potencia de salida (KW)	Costo final IVA incluido
Celda de Combustible/PEM	Horizon	República Checa	<a href="#">web</a>	Horizon H-12	0,012 KW	\$475.881
Celda de Combustible/PEM	Horizon	República Checa	<a href="#">web</a>	H-500 XP Fuel Cell Stack	0,5 KW	\$6.306.881
Celda de Combustible/PEM	GreenHub	Estados Unidos	<a href="#">web</a>	GreenHub 2 - 1000	0,9 KW	\$18.827.372
Celda de Combustible/PEM	Shell Eco-Marathon	Estados Unidos	<a href="#">web</a>	Horizon XP PEM Fuel Cell - 1000W	1 KW	\$15.043.679
Celda de Combustible/PEM	GreenHub	Estados Unidos	<a href="#">web</a>	GreenHub 2 - 5000	4,5 KW	\$67.199.500
Celda de Combustible/PEM	Shell Eco-Marathon	Estados Unidos	<a href="#">web</a>	Horizon 5000W PEM Fuel Cell	5 KW	\$31.420.760
Celda de Combustible/PEM	Horizon	República Checa	<a href="#">web</a>	H-5000 PEM Fuel Cell - 5kW	5 KW	\$21.062.881
Celda de Combustible/PEM	Horizon	República Checa	<a href="#">web</a>	10kW Fuel Cell Stack T-Series	10 KW	\$39.592.798
Celda de Combustible/PEM	H2E Technologies Co., Ltd	China		NESYS-10 型号 Model (China)	10 KW	\$33.198.921
Celda de Combustible/PEM	Horizon	República Checa	<a href="#">web</a>	10kW Liquid Cooled FC System HFC	10 KW	\$54.621.000

Respecto a la investigación realizada sobre los equipos disponibles en el mercado, si bien la literatura técnica reconoce la existencia de celdas de combustible tipo SOFC con potencias inferiores a 10 kW, no se encontraron equipos comerciales de este tipo en dicha categoría de potencia. En cambio, la única tecnología disponible en el mercado para este rango corresponde a celdas de combustible tipo PEMFC. Esta tecnología, gracias a su operación a baja temperatura, presenta una ventaja significativa al permitir configuraciones modulares y adaptables tanto para aplicaciones móviles como estacionarias, lo que la convierte en la opción más viable para laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba.

Durante la revisión se identificaron distintos modelos disponibles comercialmente con la misma potencia nominal, pero orientados a distintos usos (móvil o estacionario), lo cual se traduce en diferencias importantes de precio, incluso cuando las especificaciones técnicas base son similares. Esto evidencia la necesidad de considerar el contexto de uso al momento de seleccionar una tecnología. Dentro de los equipos móviles destaca la baja necesidad de equipos secundarios y su elevado costo, mientras que para los equipos estacionarios generalmente se requieren de una mayor cantidad de equipos secundarios, pero poseen un costo significativamente menor

Cabe destacar la existencia tanto de proveedores nacionales como internacionales existiendo una gran variedad de alternativas en el mercado en comparación a los usos finales para generación de calor o combustión y producción de derivados del hidrógeno verde. Dentro de las cotizaciones realizadas en el extranjero en base al precio FOB, se realizó un estimado del precio final con IVA incluyendo todo lo necesario para la obtención del equipo dentro de Chile con un aproximado del 40% basándose en casos anteriores.

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

En esta sección se describe una aproximación de la distribución de costos recomendada para proyectos con fines formativos en operación de sistemas de hidrógeno verde y derivados. Este análisis se basa en el marco de referencia de proyectos de pequeña escala, con rangos de inversión de entre 400.000 y 500.000 USD, típicos de iniciativas demostrativas, de formación de personal o de validación de procesos tecnológicos.

La tabla incluida sintetiza la proporción estimada de cada componente de inversión según las tipologías propuestas en el estudio, sobre el total del presupuesto del proyecto. Esta información fue elaborada a partir de los antecedentes recopilados mediante entrevistas a expertos, encuestas a instituciones, visitas a terreno y análisis de proyectos públicos y privados. Asimismo, se contrastó con referencias internacionales relevantes, cotizaciones reales y reportes de instituciones internacionales con enfoques económicos y financieros.

Respecto a los costos operacionales anuales, se establece como referencia un valor inferior al 5% del CAPEX total, coherente con proyectos de esta escala donde el grueso de la inversión se destina a equipamiento científico y técnico de alta especialización. Este porcentaje de OPEX contempla, entre otros elementos, costos de operación y mantenimiento de los sistemas de electrólisis, compresores, almacenamiento, infraestructura de apoyo y seguros, así como los insumos necesarios de acuerdo con valores estimados en estudios de benchmarking y experiencias reportadas en proyectos piloto [65], [66], [67].

Se destaca que los bancos de pruebas de operación integral constituyen plataformas críticas para la formación de personal, la validación de tecnologías, la generación de protocolos de seguridad y la demostración de integraciones a escala reducida. Por ello, la planificación de sus costos debe contemplar no solo el equipamiento base, sino también recursos para actualizaciones tecnológicas y para la adaptación a nuevas necesidades investigativas.

La *Tabla N°72* siguiente entrega un marco de referencia orientativo, que deberá ser ajustado según la magnitud, alcance y especialización del banco de pruebas que cada institución desee implementar. Esta flexibilidad resulta esencial para que, tanto proyectos de investigación aplicada como de capacitación técnica, puedan adaptar el diseño del banco a sus objetivos específicos, asegurando coherencia con estándares de seguridad, funcionalidad y replicabilidad a mayor escala.

*Tabla N°72 Distribución orientativa de costos para bancos de pruebas para operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados.*

Tipología	Distribución de costos respecto a total de CAPEX por proyecto
Infraestructura física	< 15%
Infraestructura eléctrica y agua	< 10%
Equipamiento para producción de hidrógeno o derivados	40 - 75%
Equipamiento de acondicionamiento para hidrógeno o derivados	< 10%
Equipamiento para almacenamiento de hidrógeno o derivados	5 - 10%
Equipamiento para distribución de hidrógeno o derivados	< 5%
Aplicación de consumo	5 - 30%
Sistemas de control mediante instrumentación	< 10%
Costos operacionales anuales [65] [66] [67]	< 5%

Para la implementación de esta tipología, se propone conformar un modelo de gobernanza colaborativo basado en la figura de un clúster, que reúna actores públicos, privados y académicos con el fin de articular capacidades, fortalecer redes de colaboración y favorecer la transferencia tecnológica. Este modelo debería incluir un comité técnico multidisciplinario con representantes del centro de I+D+i responsable del proyecto, autoridades regionales, instituciones de formación técnica y profesional, gremios industriales vinculados al sector energético, y, cuando corresponda, socios internacionales como universidades extranjeras o agencias de cooperación.

Se recomienda que estos bancos de pruebas sean instalados en zonas estratégicas del país, preferentemente donde exista una alta concentración de población y actividad industrial vinculada al hidrógeno verde y sus derivados, de modo de facilitar el acceso a estas instancias formativas y operativas para personal calificado. Esta ubicación permitiría optimizar recursos, fomentar la participación de técnicos y profesionales, y dinamizar el ecosistema de innovación a nivel territorial.

La relación entre academia e industria, identificada como un aspecto crítico en entrevistas, talleres y visitas a terreno, se puede ver fuertemente reforzada a través del establecimiento de estos clústeres regionales, que promueven espacios compartidos de formación, investigación aplicada y validación tecnológica. Por ello, la gobernanza de la tipología debe garantizar la participación de múltiples actores y un esquema de coordinación flexible, capaz de responder a los desafíos tecnológicos y formativos del sector.

A continuación, se presenta un banco de pruebas identificado durante las visitas a terreno realizadas en este estudio, si bien el banco de pruebas mostrado en la *Figura N°166* no está enfocado específicamente en uso con hidrógeno, se puede observar la configuración de un banco de pruebas destinado al entrenamiento de estudiantes universitarios, en este caso es un banco de pruebas enfocado a sistemas de enfriamiento.



*Figura N°166 Banco de pruebas enfocado a entrenamiento de estudiantes en contexto universitario, Departamento de ingeniería química Institución INT-5.*

Para concluir, se destaca que la implementación de bancos de pruebas para operación integral de sistemas de hidrógeno verde y sus derivados representa una pieza clave para fortalecer las capacidades nacionales en investigación aplicada, formación técnica y validación tecnológica. La experiencia recopilada en entrevistas, talleres y visitas a terreno confirma la relevancia de ubicar estos espacios en zonas estratégicas, con apoyo de clústeres que integren industria, academia y sector público, garantizando así acceso, pertinencia y sostenibilidad. Este enfoque territorial y colaborativo permitirá no solo optimizar la inversión en infraestructura y equipamiento, sino también generar sinergias para acelerar la transición energética, impulsar la innovación y robustecer el capital humano, asegurando que los avances en hidrógeno verde beneficien de forma equitativa a todas las regiones del país.

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

A continuación, se presenta el análisis asociado a la tipología de Banco de pruebas para mantenimiento de equipos clave de hidrógeno verde y sus derivados, considerando proyectos de rango económico equivalente a los descritos previamente, es decir, inversiones totales estimadas entre 400.000 y 500.000 USD, propios de iniciativas de I+D+i, formación técnica o proyectos demostrativos.

En estos bancos de pruebas, el grueso del presupuesto tiende a concentrarse en la adquisición de equipamiento real que reproduzca las condiciones de operación de sistemas de electrólisis, compresores, tanques de almacenamiento, válvulas, instrumentación y dispositivos de seguridad. Esto permite que los usuarios practiquen procedimientos de inspección, desmontaje, reemplazo de componentes y diagnóstico de fallas en un entorno controlado.

De acuerdo con las fuentes consultadas y con el análisis de proyectos similares, se estima que los costos operacionales anuales para este tipo de instalaciones no debieran superar el 5% del CAPEX [65], [66], [67] total del proyecto, ya que se trata de bancos principalmente orientados a formación y prácticas repetitivas, con consumos moderados de energía e insumos. Estos costos operacionales incluyen labores de mantenimiento preventivo de los equipos de entrenamiento, la actualización de repuestos, la calibración de instrumentos y seguros básicos. Los porcentajes y partidas detalladas para cada componente de inversión se mostrarán en la *Tabla N°73*.

*Tabla N°73 Distribución orientativa de costos para bancos de prueba para mantenimiento de equipos clave de hidrógeno verde y derivados.*

Tipología	Distribución de costos respecto a total de CAPEX por proyecto
Infraestructura física	< 15%
Infraestructura eléctrica y agua	< 10%
Equipamiento para producción de hidrógeno o derivados	40 - 75%
Equipamiento de acondicionamiento para hidrógeno o derivados	< 10%
Equipamiento para almacenamiento de hidrógeno o derivados	5 - 10%
Equipamiento para distribución de hidrógeno o derivados	< 5%
Aplicación de consumo	5 - 30%
Sistemas de control mediante instrumentación	< 10%
Costos operacionales anuales [65] [66] [67]	< 5%

Respecto a la gobernanza, se sugiere que este tipo de bancos de pruebas se inserten en clústeres tecnológicos regionales ubicados en zonas estratégicas, con presencia activa de universidades, empresas, asociaciones gremiales y agencias públicas. Esta gobernanza colaborativa permitirá actualizar continuamente los contenidos de formación, adaptar los protocolos a estándares internacionales, facilitar la articulación de prácticas con necesidades reales de la industria y mejorar la eficiencia de las inversiones públicas y privadas. Además, la localización de estos bancos en zonas estratégicas con alta densidad de población técnica o industrial optimiza el acceso al entrenamiento y refuerza la articulación entre academia e industria, aspecto validado tanto en talleres como en entrevistas y visitas de campo realizadas para este estudio.

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

Este banco de pruebas constituye una tipología orientada a la formación técnica y la investigación aplicada, enfocada en la operación, monitoreo y control de procesos vinculados al hidrógeno verde y sus derivados. Su principal característica es que permite recrear, en un entorno seguro y controlado, condiciones de operación reales mediante plataformas de simulación digital, sistemas SCADA, interfaces HMI y gemelos digitales. De este modo, los usuarios pueden entrenar la gestión de variables críticas como presión, temperatura, caudal, pureza del hidrógeno, el manejo de alarmas y la toma de decisiones frente a perturbaciones del sistema, sin exponerse a riesgos físicos ni requerir hidrógeno real [68], [69].

La evidencia internacional indica que este tipo de bancos de pruebas es ampliamente adoptado en industrias de alto riesgo, como la generación de energía, procesos químicos y plantas nucleares, con resultados favorables en la mejora de competencias y la reducción de incidentes. El modelo permite integrar herramientas de software industrial equivalentes a las empleadas en plantas reales, contribuyendo a desarrollar habilidades directamente aplicables al entorno laboral, al mismo tiempo que facilita la estandarización de procedimientos y la transferencia de buenas prácticas [70].

En el contexto específico del hidrógeno verde, la incorporación de bancos de simulación y control cobra especial relevancia, ya que no solo entrena la operación básica de plantas de electrólisis o estaciones de carga, sino que también facilita la adquisición de competencias digitales avanzadas en monitoreo, análisis de datos, programación de autómatas, integración con sistemas de gestión energética, ciberseguridad industrial, modelado de procesos y validación normativa, todos aspectos esenciales para consolidar la industria del hidrógeno de forma segura y eficiente [71], [72]. Por otra parte, es posible complementar la formación operativa con la implementación de gemelos digitales, que reproducen virtualmente los procesos de una planta o laboratorio. Estos entornos permiten entrenar al personal de manera segura y sin requerir la infraestructura física, lo que puede reducir hasta en un 40 % la inversión total en capital al aprovechar estos modelos para validar procedimientos, optimizar parámetros y capacitar competencias antes de operar en instalaciones reales [73].

Respecto a la inversión asociada, estos bancos de pruebas presentan un CAPEX considerablemente menor que los bancos físicos, al no necesitar equipamientos específicos. Sin embargo, se requiere contar con un mínimo de infraestructura física, infraestructura eléctrica e instrumentación como PLC, paneles HMI, sistemas de red industrial y softwares especializados para que las simulaciones operen con las condiciones de realismo necesarias.

A modo de referencia, se presenta la siguiente *Tabla N°74* de costos orientativos para la implementación de un banco de pruebas de simulación y control con fines formativos en hidrógeno verde, considerando tanto licencias de software como hardware esencial y obras físicas mínimas.

*Tabla N°74 Distribución orientativa de costos para bancos de prueba para simulación y control de sistemas de hidrógeno verde y derivados.*

Categoría	Descripción	Rango estimado (USD)	Fuente
Infraestructura física	Espacios físicos, salas, red de conexiones	15 000-30 000	-
Infraestructura eléctrica	UPS, cableado industrial, iluminación	10 000-20 000	-
Instrumentación y hardware	Computadores PC, PLC, HMI, switches, servidores	5 000-50 000	<a href="#">web</a>
Software SCADA/HMI	Ignition, WinCC, AVEVA	10.000-100.000	<a href="#">web</a>
Simulación de procesos	Aspen HYSYS, UniSim	20.000-50.000/año	<a href="#">web</a>
Gemelo digital/modelado	ANSYS Twin Builder	30.000-100.000/año	<a href="#">web</a>
Análisis de datos industriales	PI System, Power BI	0-15.000	<a href="#">web</a>
Costos operativos (OPEX) [65] [66] [67]	Sueldos, mantenimiento, soporte	5.000 - 20.000/año	-
<b>Total estimado</b>	Banco de pruebas completo	<b>104.000 - 415.000</b>	-

El banco de pruebas para simulación, control, modelado y monitoreo de procesos asociados al hidrógeno verde representa una infraestructura importante para fortalecer las capacidades técnicas y digitales del capital humano involucrado en esta industria. Su implementación contribuye a optimizar los tiempos de formación, reducir riesgos operacionales y generar competencias directamente aplicables a los desafíos de la transición energética. Al integrar tecnologías avanzadas, desde sistemas SCADA hasta plataformas de análisis de datos y gemelos digitales, este banco de pruebas constituye un recurso estratégico que permite articular formación, innovación y seguridad, consolidando una cultura técnica robusta y alineada con los estándares internacionales de la industria 4.0 y del ecosistema del hidrógeno verde y sus derivados.

A continuación, la *Figura N°167* se presenta un banco de pruebas para la formación de estudiantes universitarios en control, monitoreo y simulación para una planta de captura de carbono.



*Figura N°167 Banco de pruebas para estudiantes con fines en formación en control, monitoreo y simulación de escenarios reales industriales bajo condiciones controladas y seguras. Departamento de ingeniería en petróleo Institución INT-5.*

## 10.2.14 Banco de pruebas para entrenamiento práctico en seguridad operativa

Esta tipología corresponde a un banco de pruebas enfocado a entrenar personal operativo, técnico y de supervisión en instalaciones industriales que utilicen hidrógeno verde y sus derivados, así como otros gases combustibles. Su objetivo es entregar competencias prácticas para la identificación de fugas, la respuesta ante liberaciones accidentales de gases a alta presión, la gestión de atmósferas explosivas, el control de válvulas y sistemas de purga, la contención de emergencias industriales y la correcta aplicación de protocolos de seguridad según normativa internacional como la ISO 19880-1, la IEC 60079 o NFPA 2, entre otras.

A diferencia de centros orientados a bomberos o rescate estructural, este banco de pruebas se diseña como un espacio formativo para personal de planta, que debe operar, mantener o supervisar sistemas de almacenamiento, distribución y consumo de hidrógeno verde y gases combustibles en condiciones reales de proceso. Por ello, la infraestructura integra elementos representativos de una planta industrial: redes de tuberías a presión, válvulas automáticas y manuales, conexiones bridadas, sistemas de venteo, detectores de fugas (portátiles y fijos), paneles SCADA de monitoreo, alarmas, zonas de evacuación, y pequeñas cantidades de gas en condiciones controladas para ejercicios prácticos.

Además, pueden incorporarse escenarios de entrenamiento con gases para prácticas de purga, presurización y pruebas de sellado sin riesgos de inflamabilidad, simulando condiciones idénticas a las reales, pero con seguridad. Esto permite entrenar maniobras críticas de paro de emergencia, pruebas de estanqueidad, arranque de sistemas tras mantenimiento y protocolos de bloqueo y consignación.

La implementación de este banco de pruebas implica inversiones relevantes en infraestructura física resistente a explosiones, ventilación forzada, redes eléctricas con protecciones normadas, equipamiento de almacenamiento de hidrógeno para ensayos de muy bajo volumen, sistemas de distribución acotados, así como instrumentación avanzada para monitoreo, detección y control seguro. Las instalaciones de menor escala utilizadas por instituciones como bomberos en Estados Unidos tienen un costo aproximado de USD 1,5 millones de dólares [74], sin embargo, las condiciones propuestas para estos bancos de pruebas apuntan a escalas más pequeñas sin necesidad de contar en primera instancia con simuladores de incendios, por ejemplo. Considerando experiencias internacionales de referencia en laboratorios de seguridad de gases industriales, el rango de inversión CAPEX se estima entre 400.000 a 500.000 USD para instalaciones de formación técnica y proyectos demostrativos de escala pequeña. Es importante considerar que existen proyectos con objetivos similares a los propuestos para esta tipología que han requerido inversiones mucho mayores a las propuestas, como es el caso de HAMMER [75], el cual contó con una inversión de USD 30 millones de dólares. En la *Figura N°168* se presenta un desglose de costos conceptuales asociados a un proyecto de instalaciones para entrenamiento contra incendios, de esta imagen se puede desprender no solo el rango de precios que se manejan en un proyecto pequeño para la formación de bomberos, sino que también se pueden identificar costos como ingeniería y permisos que para este caso corresponde a 2,5% del proyecto.

**Fire Training Facility - Conceptual Costs**

Date: 10/2/2020

Item	OPTION A				OPTION B*			
	Quantity	Unit	Unit Cost	Total Cost	Quantity	Unit	Unit Cost	Total Cost
Fire Training System	1	LS	\$ 367,000	\$ 367,000	1	LS	\$ 270,000	\$ 270,000
Training Structure Foundation	1	LS	\$ 10,000	\$ 10,000	1	LS	\$ 10,000	\$ 10,000
Clearing & Grubbing	0.40	Acre	\$ 35,000	\$ 14,000	0.40	Acre	\$ 35,000	\$ 14,000
Site Excavation	1,500	CY	\$ 35	\$ 52,500	1,500	CY	\$ 35	\$ 52,500
Gravel Borrow	700	CY	\$ 40	\$ 28,000	700	CY	\$ 40	\$ 28,000
Fine Grading & Compacting	2,100	SY	\$ 10	\$ 21,000	2,100	SY	\$ 10	\$ 21,000
Asphalt Pavement	530	Tons	\$ 100	\$ 53,000	-	Tons	\$ -	\$ 0
Reinforced Concrete Pad	55	CY	\$ 750	\$ 41,250	55	CY	\$ 750	\$ 41,250
Loam	50	CY	\$ 55	\$ 2,750	50	CY	\$ 55	\$ 2,750
Seed	300	SY	\$ 2	\$ 600	300	SY	\$ 2	\$ 600
Erosion Controls	200	LF	\$ 7	\$ 1,400	200	LF	\$ 7	\$ 1,400
Steel Shipping Container for Storage	1	LS	\$ 5,000	\$ 5,000	1	LS	\$ 5,000	\$ 5,000
Stormwater Management System	1	LS	\$ 15,000	\$ 15,000	1	LS	\$ 15,000	\$ 15,000
Fire Cistern for Runoff Collection	1	LS	\$ 33,000	\$ 33,000	1	LS	\$ 33,000	\$ 33,000
Fire Hydrants	1	Each	\$ 5,000	\$ 5,000	1	Each	\$ 5,000	\$ 5,000
6" Water Main	100	LF	\$ 100	\$ 10,000	100	LF	\$ 100	\$ 10,000
Electrical Service	1	LS	\$ 15,000	\$ 15,000	1	LS	\$ 15,000	\$ 15,000
Propane Tank, Pad & Piping	1	LS	\$ 5,000	\$ 5,000	1	LS	\$ 5,000	\$ 5,000
8' Tall Security Fence	500	LF	\$ 110	\$ 55,000	500	LF	\$ 110	\$ 55,000
Entrance Gate & Fence Gates	1	LS	\$ 13,000	\$ 13,000	1	LS	\$ 13,000	\$ 13,000
			Sub-total	\$ 747,500			Sub-total	\$ 597,500
			20% Contingency	\$ 149,500			20% Contingency	\$ 119,500
			<b>Construction Total</b>	<b>\$ 897,000</b>			<b>Construction Total</b>	<b>\$ 717,000</b>
			Engineering & Permitting	\$ 25,000			Engineering & Permitting	\$ 25,000
			Future Relocation	\$ 75,000			Future Relocation	\$ 75,000
			<b>Project Total</b>	<b>\$ 997,000</b>			<b>Project Total</b>	<b>\$ 817,000</b>

\* - Under Option B the Fire Training System would be reduced from a three container system to a two container system & the Asphalt Pavement item would be completed using the paving services mitigation item from the Newport Materials Settlement Agreement.

Note: The above items and costs are based on a conceptual site layout and should be considered for discussion purposes only.

Figura N°168 Costos empleados para proyecto de entrenamiento contra incendios con fines formativos para equipos d bomberos.

Los costos operativos OPEX, incluyen principalmente la mantención de sistemas de detección, la formación recurrente de instructores, revisión de válvulas y tuberías de ensayo y mantención de redes de control, estimándose 5% anual del CAPEX [65], [66], [67]. La Tabla N°75 muestra una distribución de costos basada en los antecedentes mostrados anteriormente en el desarrollo de esta sección.

Tabla N°75 Distribución orientativa de costos para bancos de entrenamiento práctico en seguridad operativa con hidrógeno verde y derivados.

Tipología	Distribución de costos respecto a total de CAPEX por proyecto
Infraestructura física	35 - 55%
Equipamiento para almacenamiento de hidrógeno o derivados	5 - 10%
Equipamiento para distribución de hidrógeno o derivados	5 - 10%
Sistemas de control mediante instrumentación	15 - 25%
Equipamiento didáctico y de simulación	5 - 10%
Costos operacionales anuales	< 5% anual

La *Tabla N°75* resume de forma orientativa la distribución porcentual de costos para la implementación de bancos de entrenamiento práctico en seguridad operativa aplicados al hidrógeno verde y sus derivados. Se observa que la mayor proporción del CAPEX se destina a la infraestructura física, lo cual responde a la necesidad de disponer de espacios con ventilación industrial, refuerzos estructurales y zonas de evacuación seguras, cumpliendo con normativa ATEX y estándares internacionales de seguridad de gases combustibles.

El equipamiento para almacenamiento y distribución de hidrógeno o derivados se estima entre un 5-10% cada uno, reflejando que en contextos formativos no se requiere operar grandes volúmenes de gas, sino solo volúmenes de demostración bajo condiciones estrictamente controladas. En tanto, los sistemas de control e instrumentación concentran entre 15-25% del CAPEX, dado que la detección de fugas, la supervisión de presión, y la activación de alarmas son componentes esenciales para simular situaciones de emergencia de forma segura y didáctica.

Por su parte, el equipamiento didáctico y de simulación, incluyendo software de entrenamiento, paneles HMI, y módulos de práctica de consignación, representa un 5-10% de la inversión, permitiendo entrenar procedimientos complejos sin exponer al personal a riesgos innecesarios. Finalmente, los costos operacionales anuales se proyectan menores al 5% del CAPEX, considerando mantenimiento, calibración de sensores, actualización de protocolos y reposición de gases inertes o combustibles para ejercicios periódicos.

En síntesis, la distribución de costos expuesta respalda la viabilidad técnica y económica de implementar bancos de pruebas orientados al entrenamiento en seguridad industrial para personal de plantas de hidrógeno verde. Este tipo de infraestructura permite fortalecer la cultura de seguridad, optimizar la respuesta ante emergencias, y desarrollar competencias clave para la operación segura de tecnologías de hidrógeno y sus derivados, alineándose con estándares internacionales de formación técnica.

## 10.3 Modelos de negocios y sostenibilidad

### 10.3.1 Infraestructura física y edificación

Una de las principales brechas identificadas por el ecosistema nacional es la escasa disponibilidad de infraestructura física especializada y accesible para testeo, validación y formación técnica en tecnologías de hidrógeno. En este contexto, el modelo de negocio de Infraestructura física y edificación surge como una solución estratégica. Se trata de una red de laboratorios, módulos técnicos y espacios experimentales que puedan ser utilizados por universidades, centros de formación, startups tecnológicas y empresas, bajo un esquema de arriendo o servicios compartidos. Este enfoque no solo maximiza la eficiencia del uso de equipamiento costoso, sino que además permite democratizar el acceso a capacidades técnicas de alto estándar, especialmente en regiones. Antes de seguir avanzando en el modelo de negocios propiamente tal, se sugiere avanzar a seguir colaborando entre diversos actores del ecosistema nacionales y generar alianzas internacionales con especialmente con la Unión Europea a través de Horizon Europe y la Team Europe H2 Platform, que facilitan el acceso a fondos y a redes de validación tecnológica. Tal como se levantó del estudio, para la masificación y escalamiento de la economía del hidrógeno va a depender de la atracción de capitales extranjeros y sus estándares para posicionar la infraestructura física del hidrógeno como de clase mundial.

El modelo de negocios, esta detallado en función del libro Business Model Canvas de Alexander Osterwalder (2004). El cual detalla en 9 bloques el modelo de negocios. A continuación, la *Tabla N°76* muestra un resumen de cada uno de ellos.

*Tabla N°76 Modelo de negocios para infraestructura física y edificaciones destinadas a tecnologías de hidrógeno, estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Detallada
Propuesta de Valor	Proveer espacios físicos equipados para I+D y certificados para el cumplimiento la normativa nacional vigente en el hidrogeno (DS13, Ministerio de Energía) para diversas tecnologías de este energético: Laboratorios, salas técnicas y zonas de prueba.
	Permite a universidades, startups, centros tecnológicos y empresas validar tecnologías, realizar ensayos estandarizados y capacitar personal sin necesidad de inversión individual elevada. <i>Ejemplo: una empresa emergente puede arrendar un módulo por semanas para probar un electrolizador de nueva generación.</i>
Segmentos de Cliente	Universidades (Nacionales e Internacionales), Centros de formación técnica - Startups tecnológicas en energía e hidrógeno- Empresas de ingeniería - Laboratorios de certificación- Gobiernos regionales que apoyen pilotos locales.
	<i>Ejemplo: U. Técnica Federico Santa María arrienda módulos para sus estudiantes de ingeniería química y para un proyecto FONDEF.</i>
Canales	Plataforma web de reservas y pagos - Convenios con CORFO Hubs de innovación regional e hidrogeno- Rondas de negocios en ferias especializadas de Hidrógeno- Alianzas con incubadoras universitarias.
	<i>Ejemplo: el Hub H2V Magallanes refiere a empresas a la plataforma online de reservas del Centro Nacional de Pilotaje (CNP)</i>
Relación con Clientes	Sistema de membresías anuales para acceso prioritario. Servicio de asistencia técnica y soporte en instalación.
	<i>Ejemplo: una PYME con membresía accede a módulos y asistencia sin gestión previa para cada uso.</i>
Fuentes de Ingreso	Arriendo por hora, día o mes de laboratorios modulares (CLP \$80.000/hora promedio). Servicios técnicos adicionales: análisis, operación, seguridad (CLP \$250.000 por intervención)- Membresías anuales (CLP \$5.000.000 por institución)- Licencias de uso compartido de herramientas digitales (e.g., SCADA)
Recursos Clave	Infraestructura física modular- Equipamiento científico básico (cromatógrafos, compresores, ventilación)- Personal técnico y de mantenimiento- Software de reservas, trazabilidad y monitoreo

<b>Actividades Clave</b>	Gestión operativa y logística del uso compartido. Mantenimiento preventivo y correctivo. Actualización tecnológica de equipamiento. Coordinación con actores externos (universidades, CORFO, agencias europeas)
<b>Socios Clave</b>	CORFO (financiamiento y apoyo institucional)- Fraunhofer Chile y Alemania (apoyo técnico y validación)- Universidades (como operadores y cofinanciadore)- GIZ y Team Europe (asistencia técnica y capital)- Proveedores como Enapter, Siemens Energy, Ballard. Ejemplo: CORFO cubre 60% del CAPEX inicial a través del programa Industrial Rings.
<b>Estructura de Costos</b>	Costos fijos: mantención de módulos, licencias software, remuneración del personal- Costos variables: electricidad, agua, gases, reemplazo de insumos- Costos de seguro, calibración, vigilancia. Ejemplo: OPEX mensual estimado en USD 12.000 para operar dos laboratorios activos y una sala técnica.

### 10.3.2 Producción de hidrógeno verde

Desarrollar unidades de producción de hidrógeno verde de pequeña a mediana escala (10-250 kW), destinadas a abastecer la investigación y desarrollo en laboratorios, centros de formación, empresas tecnológicas, movilidad local y validación de tecnologías, en zonas con alto potencial renovable (ej. Magallanes, Biobío, Antofagasta) e idealmente hacerlas llegar a zonas con poco acceso a este recurso. Dentro de la *Tabla N°77* se presenta un modelo de negocios que busca dar sustentabilidad económica en el tiempo de la producción de hidrógeno verde y vincular la producción de hidrógeno verde con fondos concursables, capitales y financiamiento nacional e internacional para la masificación de la producción de hidrógeno.

*Tabla N°77 Modelo de negocios para unidades de producción de hidrógeno verde, estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Profundizada
<b>Propuesta de Valor</b>	Provisión de hidrógeno verde certificado, producido localmente con energía renovable, para pruebas, pilotos y pequeños consumos industriales. Entrega en formatos recargables como cilindros o conexión directa a bancos de ensayo. Se enfoca en calidad, flexibilidad de volumen y trazabilidad del proceso garantizando que sea proveniente de energía limpia. Ejemplo: Centro de innovación abastece con H <sub>2</sub> a un startup que prueba motores duales H <sub>2</sub> -diésel en una flota de camiones.
<b>Segmentos de Cliente</b>	Centros de Salud, Laboratorios, centros de investigación, Universidades, Centros de formación, empresas emergentes, gobiernos locales, industria de fertilizantes, minera y manufacturera que requieren H <sub>2</sub> en cantidades controladas y certificadas.
<b>Canales</b>	Comercialización directa a través de convenios; intermediación por empresas distribuidoras de gas industrial; plataformas de reservas por demanda; ferias y redes industriales
<b>Relación con Clientes</b>	Modelo de servicio técnico recurrente (B2B), con asesoría, monitoreo de pureza y seguridad operativa. Contratos a mediano plazo (6-12 meses) y asesoría en instalación segura de procesos de almacenamiento y distribución de hidrógeno verde.
<b>Fuentes de Ingreso</b>	Venta de H <sub>2</sub> en cilindros (8-12 USD/kg), arriendo de la planta para pruebas, servicios adicionales como logística y capacitación. Ejemplo: Arriendo semanal y uso obligatorio de 500 kg de H <sub>2</sub> a 10 USD/kg del sistema a dos empresas para validar motores que usen hidrógeno.
<b>Recursos Clave</b>	Electrolizador, agua tratada, acceso a energía renovable, refrigeración de electrolizador, sistema de control y trazabilidad, operadores calificados y seguros de operación.
<b>Actividades Clave</b>	Producción diaria de H <sub>2</sub> , aseguramiento de calidad (según ISO 14687), control del sistema, mantenimiento del electrolizador, logística de entrega, elaboración de reportes de trazabilidad, relación con clientes y formación de técnicos.
<b>Socios Clave</b>	CORFO y Ministerio de Energía (financiamiento y articulación), universidades (soporte técnico y validación), proveedores de equipos, distribuidores industriales de gases (Indura), certificadores externos (TÜV, SGS), y agencias internacionales (GIZ, Clean Hydrogen Partnership).
<b>Estructura de Costos</b>	Costos iniciales (CAPEX): electrolizador, instalación, sistema de agua, seguridad. Costos operativos (OPEX): electricidad, agua, personal, mantención, certificación y seguros. La meta es reducir el LCOH bajo 6 USD/kg en 5 años.

### 10.3.3 Acondicionamiento

El uso de hidrógeno en celdas de combustible debe ser con una calidad asegurada >99,9%, en la mayoría de los casos, por lo que tener empresas que aseguren la pureza del hidrógeno es fundamental para el desarrollo de un mercado que utilice al hidrógeno como combustible. La norma ISO 14687:2005 Hydrogen fuel quality, Product specification [76] especifica las características mínimas de calidad del combustible de hidrógeno destinado a una serie de aplicaciones, tales como residenciales, comerciales, industriales, vehiculares y estacionarias. Esboza los requisitos para garantizar que el combustible de hidrógeno cumple las normas de seguridad y rendimiento. Por esta razón, consideramos necesario un modelo de negocios asociado a acondicionar el hidrógeno junto con su certificación bajo dicha normativa. Dentro de la *Tabla N°78* se presenta el modelo de negocios planteado según el Business Model Canvas

*Tabla N°78 Modelo de negocios para unidades de acondicionamiento de hidrógeno verde, estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Detallada
<b>Propuesta de Valor</b>	Servicio técnico especializado en acondicionar el hidrógeno (compresión, secado, purificación) y certificar su calidad bajo norma ISO 14687. Se garantiza trazabilidad, cumplimiento normativo y acceso a mercados exigentes como la movilidad, exportación o blending industrial. Este servicio reduce el riesgo de uso y mejora la competitividad del hidrógeno producido en el país.
	Ejemplo: Una empresa en Magallanes produce H <sub>2</sub> verde con energía eólica. El centro de acondicionamiento seca purifica y certifica su gas para exportación a Europa.
<b>Segmentos de Cliente</b>	Productores de H <sub>2</sub> (escala piloto o semi industrial)- Empresas que desarrollan motores, celdas o aplicaciones de movilidad H <sub>2</sub> . Distribuidoras de gas que requieren garantizar pureza para sus celdas de combustible, procesos de blending y/o refinerías. Municipios con pilotos de buses H <sub>2</sub> - Exportadores de derivados (amoníaco, metanol, LOHC) que necesitan asegurar calidad del insumo
<b>Canales</b>	Participación en ferias energéticas, nodos CORFO y clústeres industriales Contratos directos B2B con empresas e instituciones públicas. Alianzas con HUBs y centros de producción H <sub>2</sub> . Plataforma digital para reservas de servicio por volumen
<b>Relación con Clientes</b>	Acompañamiento técnico permanente- Acceso a reportes certificados con trazabilidad digital- Gestión flexible de reservas (on-demand o contrato fijo)- Soporte post-servicio (interpretación de resultados, mejoras de proceso)
	Ejemplo: Se firma contrato anual con una planta de H <sub>2</sub> de 100 kW para certificar mensualmente la producción y recibir retroalimentación técnica.
<b>Fuentes de Ingreso</b>	Tarifa por servicio de acondicionamiento (1-3 USD/kg) Certificación ISO 14687 por campaña (400-700 USD por lote)- Servicios de laboratorio complementarios (análisis de humedad, contaminantes, partículas)- Asesorías en sistemas de calidad y protocolos de pureza
<b>Recursos Clave</b>	Equipos técnicos: compresores (350-700 bar), secadores PSA o membrana, catalizadores- Laboratorio de análisis: cromatógrafos TCD/FID, analizadores de humedad, sensores de contaminantes- Personal técnico especializado- Software de trazabilidad y reportes digitales- Instalación física o unidad móvil para operar en diferentes regiones.
	Ejemplo: Tener un laboratorio móvil cuenta con un sistema portátil de acondicionamiento, cromatógrafo portátil y técnicos que recorren centros del norte y sur del país.
<b>Actividades Clave</b>	- Recepción y tratamiento del H <sub>2</sub> (compresión, secado, purificación)- Muestreo y análisis con trazabilidad (norma ISO 14687)- Emisión de informes certificados- Calibración de equipos y aseguramiento de calidad interno- Formación continua de técnicos
<b>Socios Clave</b>	- CORFO, Ministerio de Energía (cofinanciamiento, articulación territorial)- Fraunhofer Chile, TÜV Rheinland, SGS (validación y protocolos)- VICI, Air Liquide, Parker (proveedores de equipos)- Centros académicos (UCSC, UTFSM, UAI) para formación técnica y ensayos colaborativos- Clientes ancla (municipios, proyectos mineros o industriales)
<b>Estructura de Costos</b>	-CAPEX: laboratorio base o móvil (300.000-500.000 USD), incluyendo compresor, secador, cromatógrafo, unidad de tratamiento- OPEX: energía, mantención, personal, calibración, certificación interna, seguros- Otros: licencias software, gastos de operación regional, comunicaciones

### 10.3.4 Instrumentación de hidrógeno verde y derivados.

Dentro del estudio, se pudo constatar que todas las plantas pilotos instaladas en los distintos centros tenían la demanda de poder realizar un monitoreo de las condiciones del hidrógeno y el cumplimiento de la normativa. Por esta razón, dentro de la *Tabla N°79* se presenta un modelo de negocios Canvas para un sistema de instrumentación especializada en hidrógeno verde, con enfoque en cumplimiento normativo (DS N°13 SEC, NFPA 2), vigilancia remota y respuesta ante emergencias.

*Tabla N°79 Modelo de negocios para instrumentación de hidrógeno verde y derivados, estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Detallada
<b>Propuesta de Valor</b>	Sistema integral de instrumentación que incluye sensores, actuadores, SCADA y software de monitoreo remoto para garantizar el cumplimiento normativo (DS N°13, NFPA 2) con capacidad de detección de fugas, control de presión/temperatura y activación automática de protocolos de seguridad. El sistema es interoperable con plataformas de emergencia, puede integrarse a redes de incendios y comunicar eventos con bomberos. Ejemplo: Externalizar el suministro, instalación y mantenimiento de los sistemas de medición y seguridad de una planta de hidrógeno verde.
<b>Segmentos de Cliente</b>	Productores y consumidores de H <sub>2</sub> (pilotos o industriales). Municipalidades con flotas o calderas a H <sub>2</sub> . Centros I+D (para validar dispositivos). Instalaciones críticas con gases industriales (plantas químicas, hospitales, universidades)
<b>Canales</b>	Venta directa a través de empresas Constructoras o integradores. Licenciamiento anual de plataforma web. Red de instaladores autorizados por zona. Ferias industriales, nodo CORFO, convenios con municipalidades
<b>Relación con Clientes</b>	Servicio de instalación y configuración. Monitoreo y soporte 24/7 vía plataforma. Contrato de mantenimiento y actualizaciones- Panel de alertas móviles + reporte automático a autoridades (SEC, SMA, Bomberos)
<b>Fuentes de Ingreso</b>	Venta de kits de instrumentación (5.000-40.000 USD)- Licencia de software tipo SaaS (300-1.500 USD/mes)- Mantenimiento y calibración (USD 2.000-5.000 USD/año)- Consultoría y entrenamiento técnico- Servicio de respuesta rápida y auditoría técnica
<b>Recursos Clave</b>	Equipos certificados: sensores ATEX, actuadores, SCADA. Plataforma digital propia o en la nube- Personal experto en normativa SEC/NFPA. Acuerdos con SEC, bomberos y redes de emergencia. Infraestructura móvil para calibración
<b>Actividades Clave</b>	Desarrollo e integración de sistemas de monitoreo- Instalación, puesta en marcha y capacitación. Calibración periódica y control de calidad. Reportes automáticos a autoridades reguladoras. Soporte en emergencias y eventos críticos
<b>Socios Clave</b>	CORFO, Ministerio de Energía (financiamiento y validación). SEC y Cuerpo de Bomberos de Chile (protocolo de comunicación). Fraunhofer, UCSC, UTFSM (validación científica). Empresas como WIKA, MSA, Parker (equipamiento)
<b>Estructura de Costos</b>	CAPEX inicial: sensores y SCADA (USD 30k-100k)- OPEX: personal técnico, calibración, software, mantenimiento- Certificaciones, seguros, actualizaciones- Desarrollo e integración a red de respuesta y comunicación

### 10.3.5 Producción de derivados de hidrógeno verde

En el estudio se pudo identificar al menos dos empresas emergentes en la producción de derivados de hidrogeno verde. La primera es Institución J que mediante la producción de hidrógeno verde y síntesis de amoniaco verde busca generar fertilizantes. Por otro lado, la Institución O, desarrolla combustibles sintéticos utilizando hidrógeno verde como insumo principal, el cual luego la vende como combustible premium para autos de alta gama en Europa. Ambos casos, son válidos para la producción de derivados y tienen un modelo de negocios. Dentro de la *Tabla N°80* se presenta un modelo de negocios para la producción de derivados de hidrógeno verde, como fertilizantes y e-fuels, basado en experiencias de empresas nacionales, y estructurado según el Business Model Canvas.

*Tabla N°80 Modelo de negocios para producción de derivados de hidrógeno verde, estructurado en los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Profundizada
Propuesta de Valor	Producción de fertilizantes verdes (amoníaco) y e-fuels de baja huella, utilizando H <sub>2</sub> verde y CO <sub>2</sub> /bio-ceniza de biomasa. Alternativa local y sostenible a fertilizantes importados. Garantía de trazabilidad y cumplimiento normativo nacional y exportable.
	Ejemplo 1: COMASA H2V genera amoniaco desde H <sub>2</sub> por ERNC y residuos C de biomasa, orientado a agricultura regional y exportación
	Ejemplo 2: HIF vende e-fuel para mercado de combustible europeo premium carbono neutral.
Segmentos de Cliente	Agricultores y cooperativas regionales. Empresas agroindustriales. Comercializadores de fertilizantes- Consumidores de e-fuels (transporte pesado, autos de lujos que no quieren contaminar)
Canales	Venta directa a productores/regionales- Asociaciones sectoriales (Fedefruta)- Distribuidores locales y cooperativas- Plataformas online
Relación con Clientes	- Asistencia y asesoría técnica que incluye soporte técnico y análisis de suelo para optimizar uso - Contratos por temporada agrícola- Acompañamiento I+D para adaptación local- Certificación de producto - Marca con valores de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.
Fuentes de Ingreso	Venta de fertilizante (300-500 USD/T).
	Venta e-fuels (2-3 USD/L) - Servicios de I+D (validación laboratorio/semis)
Recursos Clave	Electrolizadores, planta de amoniaco (Haber-Bosch), planta biomasa- Biomasa+CO <sub>2</sub> , agua, energía ERNC- Infraestructura piloto y logística- Know-how técnico
Actividades Clave	Operar producción continua amoniaco y e-fuels. Gestión de biomasa, captura y purificación- Validación técnica y ensayos pilotos- Logística y distribución local/exportable
Socios Clave	CORFO y Programa PTEC (financiamiento)- UFRO (I+D y laboratorio)- Gasco, ENAP (infraestructura y distribución)- Empresas ERNC y ONGs (bio-ceniza)
Estructura de Costos	CAPEX: planta piloto (~10.000.000 USD), laboratorio, equipamiento R&D- OPEX: USD1M; coste unitario ~200 USD/T fertilizante energía, biomasa, personal, operación, mantención- Costos regulatorios, permisos y certificaciones

### 10.3.6 Consumo de hidrógeno verde y derivados para la generación de calor

En el estudio se pudo identificar al menos 5 empresas que realizaban investigación y desarrollo con la generación de calor utilizando hidrógeno y derivados como combustible. Dentro del estudio se pudo identificar la brecha en costos entre los combustibles fósiles y el hidrógeno como combustible, donde el hidrógeno no es competitivo contra combustibles fósiles como el gas natural o GLP. Por esta razón, se trabaja en generar un modelo que pueda incentivar el consumo del hidrógeno verde y derivados para la generación de calor.

Para ello, se presenta los contratos por diferencia (CpD) permite a empresas cerrar contratos de suministro energético a largo plazo con sus clientes industriales, garantizando ingresos mínimos al productor y precios competitivos al consumidor. Este esquema:

El Estado cubre el diferencial entre el precio de producción de hidrógeno y el precio de mercado de referencia (ej. GLP o gas natural). Atrae inversionistas al estabilizar los retornos. Desincentiva el uso de combustibles fósiles al hacer el hidrógeno financieramente viable.

Modelos exitosos de CpD ya han sido aplicados en países como:

- **Reino Unido:** donde el esquema de CpD fue clave para la expansión de la energía eólica marina y actualmente se adapta para proyectos de hidrógeno bajo en carbono [63]
- **Australia:** que a través del Hydrogen Headstart Program, ofrece pagos por diferencia para proyectos estratégicos, facilitando el cierre financiero de iniciativas con alto CAPEX inicial [77]

*Ejemplo: Si el costo de producir hidrógeno es 6 USD/kg y el cliente solo puede pagar 4 USD/kg, el Estado cubre los 2 USD/kg de diferencia mediante el CpD. Esto viabiliza el reemplazo de combustibles contaminantes por hidrógeno verde sin encarecer los costos energéticos para la industria.*

Considerando el esquema anterior de subvención, el modelo de negocios sería el presentado en la *Tabla N°81*.

*Tabla N°81 Modelo de negocios para incentivar el consumo de hidrógeno verde y derivados en generación de calor, basado en esquemas de subsidio tipo Contratos por Diferencia (CfD), estructurado en los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Detallada
Propuesta de Valor	Sustitución de combustibles fósiles (diésel, GLP, leña) por hidrógeno verde en sistemas térmicos industriales, eliminando parcial o totalmente emisiones locales. Dependiendo el uso de blending.
	Empresas pueden ofrecer una solución integral: producción, suministro, instalación de equipos adaptados y certificados bajo la SEC.
	Con el esquema CpD, se estabiliza el precio del H <sub>2</sub> , permitiendo una transición energética accesible. <i>Ejemplo: Industria Cerámica reduce 80% de emisiones al usar quemadores duales H<sub>2</sub>/GLP instalados por empresa local, financiados bajo contrato CpD.</i>
Segmentos de Clientes	Industrias con hornos: Cementera, Fundiciones, alimentaria. Municipalidades: Incineradores, Crematorios-Hospitales y universidades. Clientes con metas de descarbonización o bajo responsabilidad ESG
Canales	Venta directa B2B con contratos energéticos- Alianzas con empresas distribuidoras de gas- Participación en programas públicos (CORFO, GIZ)- Ferias industriales y presentaciones técnicas
Relación con Clientes	Contratos integrados (suministro de H <sub>2</sub> + instalación + mantenimiento) Soporte técnico 24/7. Informes normativos (DS N°13, SEC). Capacitación en operación de hidrógeno y seguridad. Acompañamiento en gestión de subsidios CpD

<b>Fuentes de Ingreso</b>	Venta de hidrógeno verde por kg (precio base)- Diferencial CpD (precio tope) cubierto por entidad pública en caso de precio de mercado bajo- Instalación y adaptación de sistemas térmicos- Mantenimiento preventivo- Servicios energéticos tipo ESCO <i>Ejemplo: Cliente paga 4 USD /kg; QUEMPIN recibe 6 USD /kg gracias al CpD. Instalación de quemadores cotizada en 15.000 USD.</i>
<b>Recursos Clave</b>	Electrolizadores (10-250 kW). Red logística de distribución H <sub>2</sub> (trailers, cañerías, cilindros). Quemadores y calderas duales. Sistema de monitoreo remoto de emisiones- Personal técnico certificado y normativa de seguridad actualizada
<b>Actividades Clave</b>	Producción, almacenamiento y entrega segura de hidrógeno verde. Ingeniería de adaptación térmica (quemadores, controladores, válvulas). Cumplimiento de normativas técnicas y ambientales. Coordinación de subsidios CpD con entidades públicas
<b>Socios Clave</b>	Ministerio de Energía y SEC (regulación y permisos)- CORFO (cofinanciamiento de prototipos y subsidios CpD)- GIZ, BancoEstado (apoyo financiero)- Fabricantes (Baltur, EM, Fives)- Laboratorios Certificadores para validación técnica y formación de personal técnico (SICAL Ingenieros S.A., DICTUC, CESMEC)
<b>Estructura de Costos</b>	CAPEX: equipamiento térmico adaptado, instalación, instrumentación, sistemas de monitoreo- OPEX: agua desionizada, electricidad, mantenimiento, seguros, certificaciones- Gestión y auditoría de contratos CpD- Costos administrativos, legales y de capacitación técnica

### 10.3.7 Consumo de hidrógeno verde y derivados para la electricidad.

En la hoja de ruta del hidrógeno, impulsada por la Estrategia Nacional de Hidrógeno. Las soluciones de consumo de hidrógeno verde y derivados para la electricidad incluyen la generación de electricidad mediante celdas de combustible para transporte, grúas horquillas, sistemas off-grid y respaldo energético, ofrecen una vía concreta hacia la descarbonización de sectores difíciles de electrificar directamente.

Consideramos, que una de las claves para asegurar la viabilidad económica y el escalamiento sostenible del modelo de negocios que se presentará es la implementación de Contratos por Diferencia (CpD). Este mecanismo garantiza un precio mínimo de referencia para el productor de H<sub>2</sub>, cubriendo la diferencia entre el precio de mercado y un precio acordado. De esta manera, se reduce el riesgo financiero, incentivando inversiones tempranas en infraestructura de hidrógeno. Tal como se explicó en la tipología anterior: *“Consumo de hidrógeno verde y derivados para la producción de calor”*.

Estos contratos ya han tenido buenos resultados en UK y Australia. Por lo que se proponen en este modelo de negocios también.

Considerando este esquema de subvención, el modelo de negocios se presenta dentro de la *Tabla N° 82*.

*Tabla N° 82 Modelo de negocios para consumo de hidrógeno verde y derivados para la electricidad mediante celdas de combustible, con apoyos de Contratos por Diferencia (CpD), estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Detallada
<b>Propuesta de Valor</b>	Soluciones eléctricas limpias, a través de celdas de combustible con hidrógeno verde para grúas horquillas, camiones, buses y soluciones off-grid. Reducción de emisiones, operación silenciosa, alta eficiencia y acceso a incentivos verdes y Contratos por Diferencias (CpD) para mejorar viabilidad económica. <i>Ejemplo: Proyecto de 5 grúas horquillas H<sub>2</sub> en una planta portuaria de Valparaíso, con contratos CpD respaldando el suministro.</i>
<b>Segmentos de Cliente</b>	Operadores logísticos (puertos, aeropuertos). Empresas de distribución urbana. Operadores de flotas públicas o privadas. Infraestructuras aisladas (zonas extremas, postas rurales)

<b>Canales</b>	Venta directa de módulos de celdas + H <sub>2</sub> . Arriendo de flotas que usen H <sub>2</sub> (modelo leasing operativo). Plataforma digital de monitoreo. Asociaciones estratégicas con importadores de flotas (BYD, Toyota, Hyundai)
<b>Relación con Clientes</b>	Contratos por uso mensual de energía (USD/kWh). Soporte técnico y mantención. Garantía de disponibilidad energética (>95%). Plataforma de análisis en línea y trazabilidad energética
<b>Fuentes de Ingreso</b>	Venta o arriendo de equipos con celdas de combustible. Venta de electricidad H <sub>2</sub> (USD/kWh). Venta de servicios de instalación, regularización y mantenimiento. Servicios energéticos llave en mano - Bonos de carbono por electromovilidad. Estaciones móviles de recarga H <sub>2</sub> con para flota en lugares aislados. Ejemplo: Ingreso mensual de 8.000 USD por arriendo de flota H <sub>2</sub> + contratos de O&M + venta de excedentes de créditos de carbono (VERs).
<b>Recursos Clave</b>	Celdas de combustible PEM o SOFC (Plug Power, Ballard)- Trailers o módulos de H <sub>2</sub> recargables- Estaciones móviles o fijas de carga H <sub>2</sub> - Software de control energético + certificación ISO 19880-1
<b>Actividades Clave</b>	Suministro y mantenimiento de celdas de combustible. Gestión logística del H <sub>2</sub> (producción/distribución). Optimización de consumo energético por flota. Gestión de CpD con Estado o socios estratégicos
<b>Socios Clave</b>	CORFO GIZ, BID, H2Global (financiamiento)- Proveedores tecnológicos: Plug Power, Toyota, Hayan- Distribuidores: Abastible, Linde, SEC y Ministerio de Energía (normativa)
<b>Estructura de Costos</b>	CAPEX: celdas, vehículos, estaciones de recarga, software- OPEX: H <sub>2</sub> , logística, técnicos, seguros, mantenimiento, monitoreo. Costos regulatorios y de certificación. Costos asociados a la operación bajo CpD

### 10.3.8 Banco de pruebas para operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados.

Chile cuenta con un valioso capital humano compuesto por ingenieros químicos, eléctricos, mecánicos y científicos con alta capacidad técnica. Sin embargo, la llamada "transición energética" en el país no es un reemplazo total del sector energético tradicional, sino una diversificación productiva, en la que conviven industrias como el solar, el gas, electricidad y ahora, el hidrógeno verde.

El estudio ha demostrado que el desafío no es sólo reconvertir trabajadores, sino ampliar la base laboral técnica disponible, atrayendo y formando talento en regiones estratégicas para que los proyectos no se detengan por falta de capacidades especializadas. En este contexto, ofrecer plataformas de formación modular y credenciales, que permitan a trabajadores con habilidades afines (químicos, gasistas, eléctricos) reentrenarse rápidamente en tecnologías del hidrógeno, más allá de la certificación de instalador clase 5, que entrega la SEC.

Adicionalmente, el desarrollo de bancos de Prueba integrales para tecnologías de hidrógeno podría representar una herramienta clave para validar y certificar tecnologías nacionales y extranjeras (producción, almacenamiento, uso) tal como lo hacen los laboratorios certificadores como SICAL, CESMEC o DICTUC.

De este modo, los bancos de pruebas consideramos que son el motor del ecosistema de desarrollo del hidrógeno verde, habilitando la capacitación continua de una fuerza laboral calificada como también la certificación de tecnologías para generar ingresos adicionales.

Se propone un modelo de negocios dentro de la *Tabla N°83* que pueda ser sostenible en el tiempo los bancos de pruebas.

*Tabla N°83 Modelo de negocios para bancos de pruebas de operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados, orientado a la formación técnica, validación tecnológica y certificación, estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque	Descripción Detallada
<b>Propuesta de Valor</b>	Un centro de pruebas integral que ofrece <b>capacitación, validación del personal y certificación</b> para tecnologías de hidrógeno (producción, celdas, combustión, derivados). Equipado con instrumentación,

	módulos experimentales, y conectividad con autoridades. Capacitación basada en estándares reconocidos por instituciones internacionales. ( <a href="https://ihrdc.com">https://ihrdc.com</a> ) Ejemplo: Instalación de módulos de prueba con electrolizadores, pilas PEM, sistemas SCADA y protocolos NFPA/SEC, además de cursos certificados para técnicos.
<b>Segmentos de Cliente</b>	Fabricantes, representantes de marcas e importadores de equipos H <sub>2</sub> y celdas de combustible. Universidades e institutos técnicos. Startups tecnológicos. Constructoras e integradores de planta. Autoridades regulatorias (SEC)
<b>Canales</b>	Alianzas con universidades y centros tecnológicos. Portales de CORFO. Liceos e Instituciones de educación técnica- Plataformas de formación online. Participación en ferias internacionales de energía.
<b>Relación Clientes</b>	Membresía institucional (acceso continuo). Proyectos "por demanda" con seguimiento técnico. Formación técnica certificada. Plataforma de reservas y resultados digital
<b>Fuentes de Ingreso</b>	Servicios de calibración y certificación según la SEC. Tarifas por uso de banco de prueba (horas/días)- Inscripción en cursos técnicos - Contratos de I+D con empresas y fondos públicos
<b>Recursos Clave</b>	Instalaciones autorizadas por la SEC (laboratorios, módulos, instrumentación). Equipos de testeo: cromatógrafos, sensores, SCADA. Profesionales expertos en normativas y operación H <sub>2</sub> . Acreditación internacional
<b>Actividades Clave</b>	Operación de pruebas y ensayos. Capacitación técnica y cursos certificables. Mantenimiento y calibración de equipamiento. Emisión de informes y soporte normativo- Alineación con estándares SEC/NFPA
<b>Socios Clave</b>	Institutos Internacionales y nacionales de formación de hidrógeno (contenido y certificación en capacitación) Universidades públicas. SEC (acreditación y respaldo) CORFO/Horizon Europe/Eureka (financiación). Alianza con institutos de formación para complementar módulos presenciales con e-learning certificados.
<b>Estructura de Costos</b>	CAPEX: módulos de prueba, instrumentación, infraestructura. OPEX: personal, calibración, licencias software, seguros. Costos de acreditación, difusión y formación continua

### 10.3.9 Banco de pruebas para simulación y control de sistema de hidrógeno verde.

En el contexto actual de transición energética, la inversión en tecnologías asociadas al hidrógeno verde debe estar acompañada de procesos rigurosos de validación técnica, económica y de seguridad. Antes de entrenarse activos físicos de alto costo, como electrolizadores, sistemas de almacenamiento o plantas de síntesis de derivados, se vuelve indispensable contar con entornos de simulación avanzados que permitan modelar, simular y prever el comportamiento del sistema bajo múltiples condiciones operativas.

En esta línea, los Bancos de Prueba para simulación y control de sistemas H<sub>2</sub> y derivados se configuran como una herramienta clave para reducir el riesgo, acelerar la innovación y facilitar la interoperabilidad tecnológica. Estas plataformas combinan software de modelado digital con infraestructura física escalable, permitiendo validar configuraciones de electrolizadores, celdas de combustible, generación de e-fuels o producción de amoníaco verde, sin necesidad de realizar inversiones prematuras en instalaciones de gran escala.

A continuación, en la *Tabla N°84*, se presenta el modelo de negocios propuesto para bancos de pruebas para simulación y control de sistemas H<sub>2</sub> y derivados, estructurado según los 9 bloques del enfoque Business Model Canvas.

*Tabla N°84 Modelo de negocios para bancos de pruebas para simulación y control de sistema de hidrógeno verde, orientado a la formación técnica, validación tecnológica y certificación, estructurado según los 9 bloques del Business Model Canvas.*

Bloque Canvas	Descripción Detallada
<b>Propuesta de Valor</b>	Ofrecer un servicio completo de simulación, testeo y control de sistemas H <sub>2</sub> y derivados (e-fuels, amoníaco) usando software avanzado para modelado integral de procesos desde producción hasta downstream. Apoyo con instrumentación física, datos en tiempo real y certificación técnica. Ejemplo: Un ejemplo podría ser Southern Lights. Su solución digital permite a desarrolladores de proyectos y actores industriales simular, optimizar y escalar proyectos de hidrógeno verde y amoníaco con una alta precisión técnica

<b>Segmentos de Cliente</b>	Desarrolladores de proyectos H <sub>2</sub> -Power-to-X Empresas Constructoras y Montaje de instalaciones de hidrógeno. Universidades e institutos de investigación
<b>Canales</b>	Suscripción al software + acceso a banco de pruebas. Integración con programas CORFO/Horizon Europe Demostraciones en ferias y pitches técnicos. Plataforma digital con demos y módulos de prueba
<b>Relación con Clientes</b>	Onboarding con apoyo técnico y soporte experto Acceso continuo a updates del software y nuevas funcionalidades. Formación in situ o remota. Emisión de reportes auditables y consultoría de optimización
<b>Fuentes de Ingreso</b>	Modelo de suscripción por usuario o equipo. Tarifa por tiempo de uso de banco físico (horario/día). Servicios técnicos (optimización, validación, calibración). Formación certificada técnica
<b>Recursos Clave</b>	Software de simulación y diseño (modelo Southern Lights). Infraestructura física (módulos instrumentados, SCADA, analítica). Personal experto en modelado y en ejecución de pruebas físicas. Acreditación ISO / NFPA
<b>Actividades Clave</b>	Modelado técnico y económico de proyectos H <sub>2</sub> -Power-to-X- Ensayos físicos en banco de pruebas Calibración y aseguramiento metrológico. Formación a usuarios y emisión de informes técnicos
<b>Socios Clave</b>	Servidores. AWS. Universidades para entrenamiento y validación. Proveedores de instrumentación y certificadores técnicos.
<b>Estructura de Costos</b>	Licencias software y mantenimiento (USD 50k/año) CAPEX hardware (USD 500k para banco físico). OPEX (personal, calibración, insumos, energía, seguros)- Costos asociados a formación y certificación técnica

## 10.4 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 para la venta de combustible sintético.

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.

## 11 Propuesta de red de colaboración

El ecosistema nacional de investigación, desarrollo e innovación vinculado al hidrógeno verde enfrenta brechas estructurales que limitan su capacidad de crecimiento, particularmente la baja disponibilidad de infraestructura especializada accesible para la experimentación, validación tecnológica y formación técnica. Tal como se evidencia en el estudio, universidades, centros de investigación y empresas deben realizar inversiones individuales en equipamiento de alto costo o recurrir a la externalización de servicios, lo que genera ineficiencias, retrasa la transferencia tecnológica y reduce la competitividad del país en materia de investigación, desarrollo, innovación y formación de capacidades técnicas avanzadas.

Frente a este escenario, se propone la creación de una Red Nacional de Colaboración en I+D+i en torno al hidrógeno verde y sus derivados, orientada a conectar y articular los esfuerzos de instituciones públicas y privadas dedicadas a la investigación, el pilotaje tecnológico y la capacitación técnica. Esta red permitirá optimizar el uso del equipamiento científico y tecnológico disponible, evitando duplicaciones, maximizando la utilización de equipos de alto valor y democratizando el acceso a capacidades técnicas avanzadas a nivel nacional.

El funcionamiento de la red se sustentará en un modelo de gobernanza común, basado en principios de cooperación, interoperabilidad y uso compartido de infraestructura, que promueva la coordinación entre los distintos actores del ecosistema y la alineación con la estrategia nacional de hidrógeno. Su diseño busca consolidar un marco estable y sostenible que potencie la investigación aplicada, la transferencia tecnológica y la formación de capital humano especializado, contribuyendo a la creación de soluciones innovadoras y a la reducción de las brechas que actualmente limitan la expansión del sector.

El propósito final de esta iniciativa es articular los esfuerzos nacionales en torno a objetivos compartidos, fortalecer la colaboración público-privada, fomentar la descentralización territorial y garantizar la sostenibilidad institucional, técnica y financiera de un sistema integrado de investigación y desarrollo en hidrógeno verde y sus derivados.

### 11.1 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 [91] [92].
- 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 [92], [93].
- 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 [92].

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 [92], [94] .
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 garantizará la continuidad de la red en el largo plazo, bajo principios de eficiencia, transparencia y corresponsabilidad entre los actores participantes [91], [92].

## 11.2 Participantes y Alcance

La red estará conformada por un conjunto articulado de instituciones públicas y privadas orientadas a la investigación, desarrollo tecnológico, innovación y formación técnica vinculadas al hidrógeno y sus aplicaciones energéticas e industriales en todo el país. Su diseño responde a la necesidad de consolidar ecosistemas de innovación nacionales capaces de integrar infraestructuras de investigación, capacidades científicas y competencias productivas bajo un marco común de interoperabilidad y cooperación.

De acuerdo con las recomendaciones internacionales, las redes de investigación más efectivas son aquellas que promueven la colaboración intersectorial entre universidades, centros tecnológicos, empresas y gobiernos regionales, organizadas bajo modelos de triple y cuádruple hélice que facilitan la transferencia de conocimiento y la generación de soluciones aplicadas. Estas estructuras, además de aumentar la eficiencia en el uso de equipamiento y la madurez tecnológica de los proyectos, fortalecen la resiliencia de los territorios y la sostenibilidad de las inversiones públicas en infraestructura científica [93], [92], [91].

Asimismo, la integración de comunidades de usuarios y plataformas territoriales de innovación permite optimizar los recursos, fomentar la formación de capital humano especializado y generar un entorno propicio para la adopción tecnológica en toda la cadena de valor del hidrógeno [95].

- **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.

### 11.3 Gobernanza y Sistema de Adhesión

El funcionamiento coordinado de una red nacional de colaboración en I+D+i requiere una estructura institucional sólida que combine una gobernanza clara con mecanismos flexibles de incorporación y participación. La experiencia internacional en gestión de redes científicas demuestra que los modelos exitosos son aquellos que equilibran la coordinación central con la autonomía regional, la transparencia con la agilidad operativa y la representación equilibrada de los sectores público, académico, tecnológico y productivo [91], [92], [93], [95].

En este marco, la red nacional de colaboración en torno al hidrógeno verde y sus derivados se estructurará sobre un modelo de gobernanza transparente, descentralizado y participativo, orientado a asegurar la toma de decisiones basadas en evidencia, la distribución equilibrada de responsabilidades y la sostenibilidad institucional a largo plazo. Este modelo busca evitar la duplicidad de funciones, fortalecer la confianza entre los actores y promover una gestión articulada de la infraestructura científica disponible en el país.

Complementariamente, se implementará un sistema de adhesión progresivo y estructurado, que regule la incorporación de instituciones mediante criterios técnicos, capacidades demostradas y compromiso con los principios de colaboración e interoperabilidad. Este sistema permitirá consolidar gradualmente una base institucional robusta, garantizando que las entidades adheridas contribuyan efectivamente al fortalecimiento del ecosistema nacional de investigación y desarrollo, y que la red evolucione con estabilidad y coherencia técnica.

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.

### 11.3.1 Dirección y ejecución

La red se organizará bajo un consejo directivo compuesto por representantes de los sectores científico, tecnológico, productivo y gubernamental. Este consejo establecerá las orientaciones estratégicas, definirá los criterios de incorporación de nuevos miembros y supervisará el cumplimiento de los objetivos definidos en el plan operativo. La ejecución estará a cargo de una gerencia técnica o secretariado ejecutivo, responsable de la implementación de los lineamientos del consejo, la administración de recursos y la coordinación de proyectos colaborativos. Se promoverá una gobernanza distribuida con nodos regionales de coordinación, asegurando la inclusión de actores territoriales y evitando concentraciones de toma de decisiones. Este enfoque responde a las recomendaciones de modelos de gobernanza federados presentes en políticas europeas de infraestructura científica, que promueven la descentralización operativa y la participación regional para fortalecer la cohesión territorial [93], [91].

### 11.3.2 Entidad coordinadora

Se establecerá una instancia nacional de coordinación que actúe como secretariado técnico de la red, con un carácter independiente y multisectorial. Esta entidad tendrá la responsabilidad de articular los esfuerzos entre el sector público, académico, industrial y territorial, promoviendo una gestión ágil y técnicamente sólida. Su mandato incluirá la definición de normas operativas, estándares de seguridad, criterios de interoperabilidad, mecanismos de evaluación y protocolos de uso compartido de infraestructura. La coordinación se basará en principios de transparencia, colaboración interinstitucional y neutralidad técnica, garantizando que las decisiones respondan a los objetivos estratégicos del ecosistema nacional de hidrógeno. Experiencias internacionales han demostrado que los modelos de gobernanza efectivos en redes de investigación se sustentan en estructuras de coordinación independientes, con representación equilibrada y atribuciones claras para evitar duplicidad institucional y asegurar la continuidad operativa [91], [95].

### 11.3.3 Sistema de adhesión

La incorporación a la red se realizará a través de un sistema de adhesión institucional, sustentado en compromisos técnicos y de colaboración. Cada Institución Zirmará un acuerdo que formalizará su incorporación y definirá su nivel de participación, los aportes comprometidos (equipamiento, tiempo de uso, personal técnico y conocimientos especializados), así como las condiciones de acceso a los beneficios y servicios compartidos de la red. Este acuerdo de membresía garantizará una relación equilibrada entre los compromisos asumidos y los beneficios obtenidos, promoviendo la corresponsabilidad en la gestión y uso de los recursos.

El sistema considerará diferentes modalidades de membresía, adaptadas a la naturaleza y capacidad de los distintos actores que integran el ecosistema de investigación, desarrollo e innovación, incluyendo instituciones académicas, centros tecnológicos, organismos públicos y empresas privadas. Se privilegiará un modelo inclusivo que permita la participación de organizaciones de diversos tamaños, evitando barreras económicas que limiten la incorporación de pequeñas y medianas empresas o entidades emergentes.

Se propone que el esquema flexible de financiamiento esté orientado a equilibrar la sostenibilidad económica con la participación equitativa de los distintos actores que integren la red. Este sistema podría contemplar la combinación de aportes monetarios y no monetarios, definidos de acuerdo con

las capacidades técnicas y financieras de cada institución. Entre las modalidades posibles de contribución se incluiría la cesión de uso de infraestructura o equipamiento, la provisión de servicios técnicos especializados, la asignación de personal con dedicación parcial o total, y el acceso a herramientas o redes de colaboración tecnológica. Asimismo, se sugiere evaluar la creación de instrumentos de coinversión o fondos rotatorios internos destinados a respaldar actividades de mantenimiento, modernización tecnológica y capacitación técnica. De esta manera, el modelo buscaría generar un marco adaptable que incentive la cooperación público-privada, reduzca la dependencia de financiamiento externo y permita asegurar la continuidad operativa de la red en el largo plazo.

Basándose en las experiencias internacionales en gestión de redes y clústeres de innovación, se recomienda la adopción de esquemas de membresía escalonada, donde los distintos niveles de contribución otorguen acceso diferenciado a beneficios, propiedad intelectual o servicios. Estos modelos favorecen la eficiencia en la asignación de recursos, incentivan el compromiso activo de los miembros y promueven la equidad en el acceso a las capacidades tecnológicas y de infraestructura disponibles, entendidas como activos de valor público que deben maximizar su potencial y sostenibilidad a largo plazo [92], [95], [96].

### 11.3.4 Criterios de incorporación

La adhesión a la red se desarrollará mediante un proceso progresivo y estructurado, comenzando con un grupo inicial de miembros fundadores que cuenten con capacidades técnicas demostradas y experiencia verificable en el desarrollo, aplicación o validación de tecnologías asociadas al hidrógeno. Este enfoque gradual permitirá consolidar una base institucional sólida y asegurar que las primeras etapas del funcionamiento de la red se sustenten en actores con trayectoria, competencias certificadas y recursos técnicos suficientes para garantizar el cumplimiento de los estándares operacionales y de seguridad establecidos.

En esta primera fase, los miembros fundadores validarán los protocolos de coordinación, seguridad y operación compartida, asegurando la compatibilidad entre equipamientos, procedimientos y sistemas de gestión. Esta etapa de implementación inicial será considerada un piloto técnico y organizacional, permitiendo ajustar las herramientas de interoperabilidad, los mecanismos de gobernanza y los procedimientos administrativos antes de la apertura a nuevos integrantes. De acuerdo con las buenas prácticas internacionales observadas en iniciativas como la Iniciativa de Superclústeres de Innovación y en la gestión de Infraestructuras de Investigación, la incorporación progresiva mediante un proceso por fases reduce riesgos y evita destinar recursos a proyectos o instituciones que aún no cuentan con la madurez técnica necesaria. Modelos similares aplicados en alianzas internacionales, como T4EU, han demostrado la utilidad de las fases piloto para evaluar la viabilidad técnica y detectar tempranamente las barreras operativas y normativas.

Posteriormente, la red abrirá convocatorias periódicas de adhesión, priorizando criterios de descentralización territorial, complementariedad técnica y contribución al fortalecimiento del ecosistema nacional. Se fomentará la participación de instituciones localizadas fuera de los polos tradicionales de desarrollo científico, con el fin de equilibrar territorialmente la distribución de capacidades y ampliar la cobertura de servicios tecnológicos. Los procesos de incorporación considerarán también la experiencia y especialización de cada institución, asegurando que las nuevas adhesiones contribuyan efectivamente a cerrar brechas, alinear fortalezas regionales y consolidar una ventaja competitiva compartida, de acuerdo con los lineamientos observados en modelos de clústeres industriales y tecnológicos.

El modelo de expansión gradual de la red, basado en la madurez tecnológica y la validación operativa, responde a los principios de sostenibilidad y calidad recomendados por la literatura internacional sobre gestión de infraestructuras científicas. Experiencias como la de los centros Fraunhofer en Europa o la Hoja de Ruta Nacional de Infraestructuras de Investigación de los Países Bajos evidencian que las redes consolidadas requieren períodos de maduración técnica y organizacional antes de alcanzar un impacto sostenido en los ecosistemas de innovación. Este enfoque permite estabilizar las capacidades, optimizar los recursos y garantizar la continuidad de la operación. Asimismo, se promoverá que cada nueva adhesión esté condicionada a la disponibilidad de recursos suficientes para garantizar el mantenimiento, actualización y operación eficiente de los activos compartidos, evitando los vacíos financieros que han afectado la sostenibilidad de otras redes de investigación.

En conjunto, este modelo de adhesión progresiva, validación técnica inicial y expansión controlada constituye una estrategia de bajo riesgo que permitirá a la red consolidarse de manera robusta, fortaleciendo la interoperabilidad entre sus miembros, asegurando la calidad de sus servicios y garantizando su sostenibilidad en el largo plazo [93], [92], [91], [96].

### 11.3.5 Coordinación y seguridad

La coordinación y la seguridad de una red de infraestructuras de investigación requieren un modelo de gestión digital integrado, sustentado en la estandarización de procesos, la transparencia operativa y la accesibilidad de la información. Las fuentes internacionales consultadas coinciden en que las plataformas digitales de administración centralizada constituyen un componente esencial para asegurar la interoperabilidad, la sostenibilidad financiera y el cumplimiento normativo de infraestructura destinada a la investigación [93], [91], [95].

- **Plataforma digital de gestión y transparencia**

La implementación de una plataforma digital unificada permite administrar recursos, servicios y equipamientos de manera trazable, favoreciendo la eficiencia y la rendición de cuentas. Según el T4ERI Report on Barriers and Policy Recommendations, los sistemas digitales como CONNECT4RESEARCH demuestran que la gestión electrónica facilita la colaboración entre instituciones y optimiza el uso compartido de infraestructuras, siempre que se acompañe de procesos estandarizados y protocolos de interoperabilidad [95]. De igual modo, la National Research Infrastructure Evaluation en Irlanda concluye que los mecanismos digitales incrementan la visibilidad y accesibilidad de las instalaciones cuando incluyen bases de datos abiertas y actualizadas, como el LIRE Database [91].

- **Repositorio de información técnica, operativa y de seguridad**

La plataforma debe incorporar un repositorio centralizado que consolide información técnica, operativa y de cumplimiento normativo. Este enfoque facilita la toma de decisiones basadas en evidencia y mejora la trazabilidad de los servicios prestados. Las NCRIS 2025 Guidelines y el informe de Science Foundation Ireland recomiendan crear catálogos nacionales de equipamiento y servicios, de carácter dinámico y accesible, que incluyan información sobre disponibilidad, condiciones de acceso y responsables de operación [91]. La estandarización de los datos y su interoperabilidad entre plataformas nacionales e internacionales permiten maximizar la eficiencia y reducir duplicidades [95].

- **Estandarización de procesos, seguridad y cumplimiento normativo**

La estandarización de procesos constituye un requisito central para asegurar la calidad y la seguridad de las operaciones en redes de infraestructura científica. Según el PPP Reference Guide y las prácticas de gobernanza descritas por ENHANCE RI [95], la implementación de plantillas contractuales uniformes y procedimientos de acreditación garantiza la coherencia regulatoria entre los miembros de la red. La formación continua del personal técnico en materia de propiedad intelectual, protección de datos (GDPR) y derechos de uso es considerada un componente crítico de la gobernanza segura [91].

- **Interoperabilidad y eficiencia**

Las buenas prácticas internacionales destacan la interoperabilidad como condición esencial para la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos públicos. En países como Italia y Países Bajos, las políticas nacionales promueven la interconexión de plataformas a través de esquemas bottom-up, articulados con redes europeas como EOSC o ESFRI, permitiendo que las II sean tratadas como activos nacionales de libre acceso [91], [95]. Esta interoperabilidad contribuye a aumentar la productividad científica y a garantizar que las infraestructuras respondan a principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), promoviendo así la transparencia y el impacto a largo plazo [93].

## 11.4 Sostenibilidad y Modelo de Negocio

La sostenibilidad constituye uno de los pilares fundamentales para la consolidación y permanencia de una red nacional de colaboración en torno al hidrógeno verde y sus derivados. En este contexto, la sostenibilidad no se concibe únicamente desde una perspectiva económica, sino también institucional y técnica, integrando mecanismos de gobernanza, gestión operativa y diversificación financiera que garanticen la continuidad y evolución del sistema a largo plazo. El modelo propuesto busca consolidar una red capaz de mantener su funcionamiento más allá de los ciclos de financiamiento inicial, asegurando la eficiencia en el uso de los recursos, la interoperabilidad de las infraestructuras y la generación continua de valor científico, tecnológico y social.

Este enfoque integral responde a las recomendaciones internacionales en materia de gestión de infraestructuras de investigación, donde la sostenibilidad se sustenta en la solidez institucional, la eficiencia técnica y la viabilidad financiera. La articulación entre estos tres niveles permite que la red evolucione desde un esquema de inversión inicial dependiente de fondos semilla hacia un sistema autosostenible, orientado a la creación de conocimiento, la innovación aplicada y el fortalecimiento del ecosistema nacional de hidrógeno verde.

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.

### 11.4.1 Inversión inicial y financiamiento semilla

La inversión inicial constituye la base para la habilitación de infraestructura compartida, el desarrollo de capacidades técnicas y la implementación de una plataforma digital de gestión. El informe

National Research Infrastructure Evaluation de Science Foundation Ireland subraya que la inversión inicial debe cubrir tanto los costos de instalación como los de personal técnico especializado, dado que los gastos operativos y de mantenimiento no siempre son cubiertos por la financiación nacional [91]. Asimismo, el PPP Reference Guide destaca que, en las Asociaciones Público-Privadas (APP), la inversión semilla pública cumple una función catalizadora para atraer capital privado, generando un esquema de riesgo compartido y mayor eficiencia en el uso de fondos [97].

La experiencia internacional muestra que las infraestructuras estratégicas requieren recursos de habilitación inicial durante los primeros cinco años para consolidar su operación. Según las NCRIS 2025 Guidelines, este período inicial debe incluir fondos para la adquisición de equipamiento, la instalación de sistemas digitales de gestión y la contratación de personal técnico, además de un presupuesto para mantenimiento preventivo [98]. En redes colaborativas europeas, como la alianza T4ERI, se ha comprobado que la inversión inicial en plataformas digitales (por ejemplo, CONNECT4RESEARCH) fue esencial para estandarizar procesos y asegurar interoperabilidad, aunque su desarrollo y mantenimiento requirieron financiamiento continuo [95].

#### 11.4.2 Modelo de Negocio Mixto y Diversificación de Ingresos

El modelo mixto combina recursos públicos nacionales e internacionales, aportes privados y generación propia de ingresos. La evidencia del programa irlandés “Programme for Research in Third Level Institutions” muestra que la combinación de gasto público y coinversión privada permitió mantener operativas las instalaciones durante más de una década [91].

En el ámbito de las asociaciones público-privadas, la guía del Banco Mundial señala que la participación privada no solo complementa los recursos públicos, sino que introduce incentivos de eficiencia, innovación y control de costos [97]. Estas asociaciones son recomendadas especialmente para infraestructuras que generan beneficios tecnológicos y conocimiento aplicable, como las redes de hidrógeno o de energías limpias, donde la industria puede aportar equipamiento, personal o capital a cambio de acceso preferente a resultados tecnológicos.

#### 11.4.3 Ingresos operacionales

Los ingresos operacionales representan un componente esencial para garantizar la continuidad, autonomía y eficiencia de una red de colaboración de las características que se propone. Este capítulo presenta los mecanismos que permiten a la red generar recursos propios a través del uso compartido de infraestructura, la prestación de servicios técnicos, las membresías institucionales, la administración de licencias digitales colectivas y la ejecución de proyectos colaborativos de I+D. Cada uno de estos instrumentos contribuye de manera complementaria a fortalecer la base financiera y operativa de la red, asegurando que la infraestructura científica y tecnológica mantenga altos niveles de disponibilidad, actualización y calidad.

El modelo propuesto se sustenta en experiencias internacionales de gestión de Infraestructuras de Investigación, donde la diversificación de fuentes de ingreso se reconoce como una estrategia clave para reducir la dependencia de subsidios y fomentar la corresponsabilidad institucional. Así, los mecanismos descritos no solo buscan generar flujos financieros sostenibles, sino también consolidar una comunidad de práctica que valore la eficiencia, la cooperación y la reinversión en capacidades técnicas y humanas.

### 11.4.3.1 Arriendo de espacios

El uso compartido de espacios e instalaciones de investigación constituye un componente estratégico dentro de un sistema mixto de financiamiento orientado a la sostenibilidad económica de una red nacional de colaboración en I+D+i. Este modelo reconoce que los ingresos derivados del arriendo o cobro por uso de laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba no reemplazan la inversión pública ni las aportaciones privadas, sino que funcionan como un recurso complementario para fortalecer la autonomía operativa, la eficiencia del gasto y la continuidad de los servicios científicos [91], [92], [98].

Mientras que las membresías promueven el compromiso a largo plazo y la participación en la gobernanza, consolidando una comunidad de colaboración estable y corresponsable dentro de la red, el cobro por uso es esencial para cubrir los costos variables y operativos asociados al mantenimiento, operación y actualización de la infraestructura de investigación [91], [92], [95].

- **Sistema mixto de financiamiento y rol del cobro por uso:** En los modelos internacionales de gestión de Infraestructuras de Investigación, la sostenibilidad se alcanza mediante la combinación equilibrada de fondos públicos, aportaciones privadas y generación propia de ingresos. En este esquema, el cobro por uso de espacios representa una herramienta eficaz para cubrir costos operacionales y de mantenimiento, aportando estabilidad financiera y reduciendo la dependencia de subsidios externos [91].

Las “National Collaborative Research Infrastructure Strategy 2025 Guidelines” señalan que el mantenimiento y operación de las instalaciones requieren recursos continuos, y que las tarifas de acceso constituyen un medio legítimo para redistribuir los costos entre los usuarios, promoviendo así la sostenibilidad del equipamiento público [98]. Del mismo modo, el informe “National Research Infrastructure Evaluation de Science Foundation Ireland” destaca que los planes de cargos por acceso deben formar parte del plan financiero de toda infraestructura, estableciendo tarifas diferenciadas que aseguren la recuperación parcial de los costos sin limitar el acceso académico o científico [91].

Por otra parte, la generación propia de ingresos, por medio de planes de cobro por acceso, se reconoce como una práctica de sostenibilidad consolidada. En el caso irlandés, los proyectos con un valor superior a 500.000 € tienden a atraer mayor proporción de ingresos provenientes de la industria, especialmente cuando las tarifas de uso cubren parcialmente los costos de operación [91]. Este principio se alinea con las directrices del NCRIS 2025, que recomiendan establecer tarifas diferenciadas por tipo de usuario y asegurar que los fondos recaudados se destinen al mantenimiento y actualización de la infraestructura [98].

Este modelo de financiamiento mixto permite que las instituciones públicas mantengan el control estratégico de las instalaciones mientras los usuarios, académicos, públicos o privados, contribuyen proporcionalmente a los costos de operación. Así, se crea un mecanismo de coparticipación económica que fortalece la autonomía de la red, incentiva el uso eficiente de los recursos y facilita la reinversión en mantenimiento, modernización y capacitación de personal especializado [92].

### 11.4.3.2 Servicios técnicos y de apoyo

La red ofrecerá un conjunto de servicios especializados destinados a apoyar el desarrollo tecnológico, la validación de resultados experimentales y la formación técnica avanzada, contribuyendo tanto a la sostenibilidad financiera del sistema como al fortalecimiento de las capacidades nacionales en hidrógeno.

- **Servicios especializados de análisis y ensayo:** Los laboratorios y centros asociados dispondrán de capacidades para realizar análisis fisicoquímicos, caracterización de materiales, pruebas de desempeño y validaciones de componentes o sistemas. Estos servicios se ejecutarán bajo protocolos estandarizados, garantizando trazabilidad, reproducibilidad y cumplimiento de las normas técnicas vigentes. Los procedimientos y metodologías se ajustarán a estándares internacionales de gestión de calidad y seguridad aplicables a infraestructuras científicas compartidas [92].
- **Asistencia técnica y apoyo a la experimentación:** La red pondrá a disposición de las instituciones participantes servicios de apoyo para el diseño, montaje y operación de experimentos o bancos de prueba, asegurando el cumplimiento de los requisitos de seguridad y la compatibilidad entre equipos. Este servicio incluirá acompañamiento técnico, calibración de instrumentos y supervisión de operaciones críticas. Su propósito es optimizar el uso de los recursos disponibles, reducir tiempos de puesta en marcha y asegurar una operación eficiente y segura de los equipos [91].
- **Certificación y aseguramiento de calidad:** Se promoverá la implementación de procedimientos de certificación y control de calidad en los procesos de producción, almacenamiento y uso de hidrógeno, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados y fomentando el reconocimiento de la infraestructura nacional en contextos internacionales. La red podrá colaborar con organismos de normalización y entidades certificadoras para garantizar la compatibilidad con los marcos regulatorios y de seguridad industrial [93], [95].
- **Capacitación técnica y entrenamiento en seguridad:** Como parte de los servicios de apoyo, la red ofrecerá programas de entrenamiento en operación segura, mantenimiento de instalaciones y gestión de riesgos asociados al hidrógeno, dirigidos a técnicos, investigadores y personal de empresas. Estas capacitaciones contribuirán al desarrollo de competencias especializadas y al cumplimiento de los estándares exigidos por los marcos regulatorios nacionales, alineándose con los perfiles laborales definidos para la industria del hidrógeno. La literatura internacional subraya que los programas de formación integrados a las redes de infraestructura incrementan la eficiencia operativa y la sostenibilidad institucional, al crear capacidades internas para el mantenimiento y la operación de equipos [91], [95].
- **Estructura de cobro y acceso:** Los servicios técnicos y de apoyo se ofrecerán bajo un esquema de tarifas ajustadas al tipo de servicio, complejidad técnica y tiempo de dedicación. Se fomentará la inclusión de mecanismos de acceso preferente para instituciones públicas y educativas, además de la posibilidad de compensar parte de los costos mediante aportes en especie, intercambio de información o desarrollo conjunto de proyectos. Este enfoque mixto asegura que el sistema sea financieramente viable sin restringir el acceso a quienes contribuyen a la investigación y la formación técnica.

### 11.4.3.3 Membresías institucionales

La red adoptará un sistema de membresías anuales orientado a fortalecer el compromiso de las instituciones participantes y asegurar un flujo financiero estable que contribuya al mantenimiento de la infraestructura y los servicios compartidos. Este sistema se estructurará bajo criterios de equidad, corresponsabilidad y proporcionalidad, evitando esquemas rígidos que limiten la participación de actores con distinta capacidad financiera o nivel de madurez tecnológica.

- **Estructura diferenciada de membresías:** Las cuotas anuales se definirán de forma escalonada, considerando el tipo de institución (académica, tecnológica, pública o privada), su tamaño, el nivel de uso del equipamiento y los aportes directos o en especie que realice a la red. Este enfoque proporcional garantiza que las contribuciones reflejen la capacidad real de cada miembro y promueve la participación de un espectro amplio de organizaciones. Los estudios internacionales recomiendan sistemas de membresía flexible y diferenciada para equilibrar sostenibilidad y accesibilidad, especialmente en redes que integran sectores público y privado [91], [95].
- **Beneficios asociados a la membresía:** Los miembros tendrán acceso preferente a laboratorios, plantas piloto, servicios técnicos y programas de formación, además de participar en las instancias de gobernanza y planificación estratégica. También podrán acceder a licencias compartidas de software, asesorías técnicas y convocatorias internas de proyectos colaborativos. Este modelo promueve la cooperación a largo plazo y la corresponsabilidad en el desarrollo del ecosistema de investigación y desarrollo.
- **Mecanismos de compensación y colaboración:** Además del aporte económico, las instituciones podrán contribuir mediante recursos no monetarios, como la cesión de tiempo de uso de equipos, apoyo técnico, personal especializado o transferencia de conocimiento. Estos mecanismos permitirán reconocer distintos tipos de valor dentro de la red y reducir la dependencia de ingresos exclusivamente financieros. Las recomendaciones internacionales destacan que los modelos de sostenibilidad exitosos en infraestructuras compartidas combinan aportes monetarios con contribuciones en especie, fortaleciendo la cohesión institucional y el sentido de pertenencia [92], [91].
- **Gestión y revisión periódica:** Las condiciones de membresía serán revisadas de manera periódica por el consejo directivo, en función de los resultados financieros, el nivel de uso de los servicios y las necesidades de expansión de la red. Esto asegurará que el modelo se mantenga equilibrado, transparente y adaptable al contexto económico y tecnológico nacional.

### 11.4.3.4 Licencias y herramientas digitales compartidas

La administración de licencias colectivas de software científico, como simuladores de procesos, herramientas SCADA o programas de modelado y análisis técnico, representa un método viable y estratégicamente sólido para el autofinanciamiento dentro del sistema mixto de sostenibilidad económica de una red nacional de colaboración en I+D+i. Este enfoque, respaldado por la experiencia internacional en gestión de infraestructuras de investigación digitales, permite reducir costos, optimizar recursos y fomentar la interoperabilidad técnica entre las instituciones miembros [91], [95], [92].

- **El software científico como infraestructura compartida:** En los modelos internacionales de infraestructura de investigación, las herramientas digitales y el software especializado se reconocen como componentes esenciales de la infraestructura científica, al mismo nivel que los laboratorios o los bancos de prueba físicos. Las “NCRIS 2025 Guidelines” y los programas nacionales de infraestructura en los Países Bajos incluyen dentro de su definición de II las instalaciones virtuales, como redes de computación, bases de datos, entornos de simulación y plataformas de análisis colaborativo [98]. De igual modo, los fondos europeos de investigación consideran a las e-infraestructuras (sistemas de datos, software, redes y soporte TIC) como activos estratégicos que deben ser gestionados colectivamente para mejorar el acceso y la eficiencia en la inversión pública [92].
- **Licencias colectivas como instrumento de sostenibilidad:** La administración de licencias compartidas mediante esquemas de pago fraccionado permite optimizar el gasto asociado a software científico de alto costo, ampliando su disponibilidad para todas las instituciones participantes. El caso del consorcio IReL en Irlanda constituye un referente concreto: este sistema de licencias electrónicas proporciona acceso a recursos digitales y bibliográficos a las universidades participantes, y ha demostrado reducir significativamente los costos individuales de suscripción mediante financiamiento cooperativo [91].
- Este modelo de consorcio no solo mejora la eficiencia financiera, sino que también promueve transparencia, escalabilidad e interoperabilidad entre las instituciones que lo integran. En los sistemas nacionales de II, el software y las actualizaciones periódicas son considerados costos operacionales elegibles, por lo que deben incluirse en los planes financieros anuales de mantenimiento [91], [95]. La literatura sobre gestión de infraestructuras destaca que la falta de financiamiento para actualizaciones de software constituye una amenaza para la sostenibilidad, por lo que el uso de licencias colectivas compartidas mitiga directamente este riesgo [92].
- **Interoperabilidad, eficiencia y acceso equitativo:** La administración de herramientas digitales bajo un esquema colaborativo favorece la interoperabilidad técnica y organizacional de la red. Según el informe T4ERI (2024), las alianzas universitarias europeas que implementan plataformas digitales conjuntas, como CONNECT4RESEARCH, mejoran la visibilidad de recursos, reducen duplicidades y fortalecen la cooperación científica [95]. De igual forma, ENHANCERIA (2023) sostiene que la gestión coordinada de software y recursos digitales debe ir acompañada de políticas de acceso común, soporte técnico compartido y mecanismos de financiamiento sostenibles que incluyan tarifas proporcionales o contribuciones en especie. Además, la interoperabilidad derivada del uso de herramientas comunes contribuye a la armonización de datos, protocolos y formatos de investigación, facilitando la cooperación transnacional y la integración de resultados científicos. Este enfoque tiene beneficios tanto operativos como estratégicos: reduce barreras técnicas, mejora la trazabilidad y acelera la transferencia de conocimiento entre los miembros de la red [95], [92].
- **Valor agregado para el autofinanciamiento de la red:** Desde la perspectiva del autofinanciamiento, las licencias colectivas no solo generan un ahorro directo al distribuir los costos entre los usuarios, sino que también representan una fuente de ingresos operacionales recurrentes. La red puede administrar las suscripciones anuales y cobrar una tarifa proporcional a cada institución miembro, garantizando acceso equitativo y cobertura de los costos de actualización, soporte y gestión digital. Este mecanismo cumple un doble propósito: reduce los gastos individuales y, al mismo tiempo, aporta un flujo financiero predecible que fortalece la sostenibilidad global del sistema. Asimismo, la adopción de herramientas comunes consolida una infraestructura digital integrada, elemento clave para la modernización de la red y su capacidad de ofrecer servicios

colaborativos (por ejemplo, monitoreo remoto, simulación distribuida o almacenamiento de datos científicos). De este modo, el sistema de licencias colectivas se convierte en un componente estructural del modelo mixto de financiamiento, junto con los ingresos por uso compartido de infraestructura física, las membresías institucionales y los proyectos de I+D colaborativos.

#### 11.4.3.5 Proyectos de I+D colaborativos

La red fomentará la ejecución de proyectos de investigación, desarrollo e innovación colaborativos orientados al fortalecimiento tecnológico del ecosistema nacional del hidrógeno. Estos proyectos constituirán una de las principales fuentes de sostenibilidad y, al mismo tiempo, un instrumento para generar conocimiento aplicado, nuevas capacidades y transferencia tecnológica.

- **Participación en fondos competitivos y cooperación internacional:** La red podrá participar en convocatorias nacionales e internacionales de financiamiento orientadas a la investigación aplicada, la validación tecnológica y la formación de capital humano especializado. La participación conjunta de distintos tipos de instituciones (académicas, industriales, tecnológicas y territoriales) permitirá aumentar la competitividad de las propuestas y el impacto de los resultados. Los recursos obtenidos a través de estos fondos, incluidos los gastos indirectos o *overheads*, contribuirán al sostenimiento de la red y a la mejora continua de su infraestructura. La literatura internacional destaca que los esquemas cooperativos público-privados son esenciales para mantener la innovación tecnológica y reducir el riesgo asociado a la inversión individual [91], [93].
- **Proyectos de investigación aplicada y validación tecnológica:** Se priorizará el desarrollo de proyectos centrados en el diseño, prueba y optimización de tecnologías relacionadas con la producción, almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno. Estos proyectos deberán integrar fases de validación experimental y aplicación práctica, promoviendo la madurez tecnológica de las soluciones y su transferencia al sector productivo. La articulación entre centros de investigación, empresas y gobiernos regionales permitirá generar resultados con alto impacto territorial, alineados con los objetivos de transición energética y sostenibilidad. Experiencias internacionales demuestran que los proyectos de I+D colaborativos en torno a clústeres tecnológicos aumentan la productividad y la resiliencia industrial regional [93].
- **Contratos y servicios tecnológicos con empresas:** Además de los fondos competitivos, la red podrá establecer acuerdos directos con empresas y entidades productivas interesadas en desarrollar o validar tecnologías específicas. Estos contratos incluirán servicios de ensayo, prototipado, asesoría técnica o certificación, y deberán ajustarse a políticas de propiedad intelectual claras y transparentes que resguarden los intereses de todas las partes. Este modelo B2B permitirá generar ingresos complementarios y consolidar la relación universidad-industria, promoviendo la aplicación de conocimiento científico en soluciones industriales concretas [92], [95].
- **Difusión de resultados y generación de propiedad intelectual:** Los proyectos desarrollados en el marco de la red deberán fomentar la publicación de resultados, el registro de patentes y la creación de prototipos funcionales, asegurando la visibilidad del país en el ámbito internacional del hidrógeno. Asimismo, se promoverá la adopción de modelos abiertos de innovación, que faciliten el acceso a resultados de investigación sin comprometer los derechos de autor ni las condiciones de confidencialidad necesarias para la industria. Las buenas prácticas internacionales en redes de investigación aplicada subrayan que la gestión

estratégica del conocimiento y la propiedad intelectual es clave para fortalecer la competitividad y atraer inversión privada [91], [95].

La sostenibilidad financiera de una red nacional de colaboración en I+D+i depende de su capacidad para equilibrar el apoyo público con la generación autónoma de recursos. Los mecanismos analizados en este capítulo, arriendo de espacios, prestación de servicios técnicos, membresías institucionales, gestión de licencias digitales compartidas y proyectos de I+D colaborativos, configuran un sistema integral que promueve la autosuficiencia sin comprometer la misión pública de esta infraestructura. Este modelo mixto de financiamiento fortalece la estabilidad del sistema, fomenta la eficiencia en el uso de recursos y habilita la reinversión continua en mantenimiento, modernización y capacitación. Además, crea un entorno propicio para la cooperación interinstitucional, la transferencia tecnológica y la formación de capital humano especializado. La implementación coordinada de estos instrumentos permitirá que la red evolucione hacia un esquema financieramente sostenible, alineado con los estándares internacionales de gestión de infraestructuras científicas y con los objetivos estratégicos de desarrollo tecnológico y transición energética del país.

## 11.5 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 llevarán 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. En esta fase se desarrollará la plataforma de reservas y se elaborarán manuales de operación y seguridad compartidos. A finales de 2027 se ejecutará 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.

## 12 Proveedores

Con el objetivo de identificar y sistematizar información relevante sobre proveedores nacionales e internacionales, se elaboró un repositorio que agrupa equipamiento y servicios clave para la implementación de tecnologías asociadas al hidrógeno verde. Esta recopilación considera tanto equipos principales (como electrolizadores, compresores, tanques, celdas de combustible) como equipos secundarios y auxiliares. La información fue organizada siguiendo la tipología funcional del equipamiento, detallando para cada proveedor su país de origen, categoría tecnológica, descripción del producto, sitio web y contacto de correo electrónico. Esto permite facilitar futuras gestiones de adquisición, evaluación técnica o solicitud de soporte. Además, se elaboró un segundo repositorio centrada en servicios especializados necesarios para la correcta puesta en marcha, operación y mantenimiento de estas tecnologías.

A continuación, en la *Tabla N° 85*, se presentan los proveedores tecnológicos agrupados por tipo de equipo y categoría de aplicación.

*Tabla N° 85 Tabla con proveedores identificados en el estudio.*

Proveedor	País	Categoría tipología	Detalle productos proveedor	Contacto web
LONGi (Longi Solar)	China	Infraestructura eléctrica e insumos	Paneles solares, inversores	<a href="https://www.longi-solar.com">https://www.longi-solar.com</a>
Sumitomo Electric	China	Infraestructura eléctrica e insumos	Paneles solares, inversores	<a href="https://sumitomoelectric.com">https://sumitomoelectric.com</a>
Trina Solar	China	Infraestructura eléctrica e insumos	Paneles solares	<a href="https://www.trinasolar.com">https://www.trinasolar.com</a>
Bergey	EE.UU.	Infraestructura eléctrica e insumos	Turbinas eólicas (10 kW)	<a href="https://www.bergey.com/">https://www.bergey.com/</a>
Northern Power Systems	EE.UU.	Infraestructura eléctrica e insumos	Turbinas eólicas (100 kW)	<a href="https://www.nps100.com/wp/">https://www.nps100.com/wp/</a>
Proven Energy	Reino Unido	Infraestructura eléctrica e insumos	Turbinas eólicas	<a href="https://www.provenenergy.co.uk/">https://www.provenenergy.co.uk/</a>
EnviroFALK	Suiza	Infraestructura eléctrica e insumos	Sistemas de purificación de agua	<a href="https://www.envirofalk.com">https://www.envirofalk.com</a>
EVOQUA Water Technologies	EE.UU.	Infraestructura eléctrica e insumos	Sistemas de purificación de agua	<a href="https://www.evoqua.com">https://www.evoqua.com</a>
Merck Millipore	Alemania	Infraestructura eléctrica e insumos	Sistemas de agua ultrapura de laboratorio	<a href="https://www.merckgroup.com">https://www.merckgroup.com</a>
ELGA LabWater (parte de Veolia)	Reino Unido	Infraestructura eléctrica e insumos	Sistemas de purificación de agua	<a href="https://www.elgalabwater.com/">https://www.elgalabwater.com/</a>
ResinTech	EE.UU.	Infraestructura eléctrica e insumos	Resinas de intercambio iónico y sistemas de agua	<a href="https://www.resintech.com">https://www.resintech.com</a>
SMA	Alemania	Infraestructura eléctrica e insumos	Inversores fotovoltaicos	<a href="https://www.sma.de">https://www.sma.de</a>
H2U Technologies	EE.UU.	Producción de hidrógeno verde	Electrolizador PEM experimental ("Gramme 50")	<a href="https://www.h2utechnologies.com">https://www.h2utechnologies.com</a>
HyProvide (Green Hydrogen Systems)	Dinamarca	Producción de hidrógeno verde	Electrolizadores alcalinos (línea A-Series)	<a href="https://www.greenhydrogensystems.com">https://www.greenhydrogensystems.com</a>
ITM Power	Reino Unido	Producción de hidrógeno verde	Electrolizadores PEM (ej. HGas, Trident)	<a href="https://www.itm-power.com">https://www.itm-power.com</a>
Jinan Green Lab Instruments	China	Producción de hidrógeno verde	Electrolizador de laboratorio (modelo LM-3000)	<a href="https://greenlabcn.en.alibaba.com">https://greenlabcn.en.alibaba.com</a>
Nel Hydrogen	Noruega	Producción de hidrógeno verde	Electrolizadores PEM/Alcalinos (ej. Nel H6)	<a href="https://www.nelhydrogen.com">https://www.nelhydrogen.com</a>
Siemens	Alemania	Producción de hidrógeno verde	Electrolizadores PEM (ej. Silyzer 200)	<a href="https://www.siemens-energy.com">https://www.siemens-energy.com</a>
SimpleFuel	EE.UU.	Producción de hidrógeno verde	Sistema integrado de producción y abastecimiento de H <sub>2</sub>	<a href="https://www.ivysinc.com/simplefuel-main-page">https://www.ivysinc.com/simplefuel-main-page</a>
SolydEra SpA	Italia	Producción de hidrógeno verde	Electrolizador de óxido sólido (SOEC) / Celda de combustible sólida	<a href="https://www.solydera.com/en/">https://www.solydera.com/en/</a>
Proton OnSite	EE.UU.	Producción de hidrógeno verde	Electrolizadores PEM (escala pequeña)	<a href="https://www.nelhydrogen.com">https://www.nelhydrogen.com</a>
L&W (Lenhardt & Wagner)	EE.UU.	Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados	Compresores de hidrógeno (hasta 410 bar)	<a href="https://www.lw-compressors.com">https://www.lw-compressors.com</a>
Enapter	Alemania	Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados	Secadores de hidrógeno (ej. DRY 2.1)	<a href="https://www.enapter.com">https://www.enapter.com</a>
Coltri	Chile / Italia	Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados	Compresores de hidrógeno (hasta 400 bar)	

Shanghai Sollant	China	Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados	Compresores de hidrógeno (4-5,65 Nm <sup>3</sup> /h, 60 bar)	<a href="https://www.coltri.com/es/">https://www.coltri.com/es/</a>
Wuxi Daze	China	Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados	Sistemas de refuerzo ("boosters") de hidrógeno	<a href="https://www.sollant.com/industrial-air-compressor/">https://www.sollant.com/industrial-air-compressor/</a>
Carbotainer	España	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Racks de cilindros de H <sub>2</sub> para transporte	<a href="https://www.carbotainer.es">https://www.carbotainer.es</a>
Hefei Sinopower	China	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Tanques de almacenamiento de H <sub>2</sub> (350 bar)	<a href="https://hfsinopower.en.made-in-china.com/">https://hfsinopower.en.made-in-china.com/</a>
Hexagon	Noruega / Alemania	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Cilindros de H <sub>2</sub> de alta presión (300 bar)	<a href="https://hexagon.com/es">https://hexagon.com/es</a>
Mahytec	Francia	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Tanques de almacenamiento de H <sub>2</sub> (60 bar, tipo IV)	<a href="https://www.mahytec.com/en/">https://www.mahytec.com/en/</a>
Pure Energy Hydrogen	Italia	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Tanques de almacenamiento de H <sub>2</sub> (200 bar)	<a href="https://pureenergyhydrogen.com/#">https://pureenergyhydrogen.com/#</a>
Toyota Tsusho	Japón / Corea del Sur	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Tanques de almacenamiento de H <sub>2</sub> (tipo IV, 200 bar)	
Wuxi Daze	China	Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados	Tanques de almacenamiento de H <sub>2</sub> (350 bar)	<a href="https://daze.en.alibaba.com/">https://daze.en.alibaba.com/</a>
Detectores y Sensores	Chile	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados	Detectores de gas H <sub>2</sub>	<a href="https://www.detectores.cl/">https://www.detectores.cl/</a>
Gaz Detect	Francia	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados	Detectores de gas H <sub>2</sub> (ej. ATEX OLC 100)	<a href="https://www.gazdetect.com/">https://www.gazdetect.com/</a>
Grupo Almma	Chile	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados	Detectores de gas H <sub>2</sub> (Macurco GD-6)	<a href="https://grupomalmma.cl/">https://grupomalmma.cl/</a>
Henan Bosean Electronic	China	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados	Detectores de gas H <sub>2</sub> (ej. Bosean KG60)	<a href="https://es.bosean.net/">https://es.bosean.net/</a>
International Gas Detectors (IGD)	Reino Unido	Instrumentación de hidrógeno verde y derivados	Detectores de gas H <sub>2</sub> (ej. TOC-903-X5)	<a href="https://www.gweedetector.com/">https://www.gweedetector.com/</a>
KAPSOM Green Energy	China	Producción de derivados de hidrógeno verde	Plantas de amoníaco verde (~100 ton/año)	<a href="https://www.kapsom.com/">https://www.kapsom.com/</a>
Shanghai Hydrogen Propulsion	China	Producción de derivados de hidrógeno verde	Plantas piloto de derivados de H <sub>2</sub> (~3,6 ton/año)	<a href="https://www.shpt.com/pc/en/index.html">https://www.shpt.com/pc/en/index.html</a>
Xiamen Ollital Technology	China	Producción de derivados de hidrógeno verde	Plantas piloto de derivados de H <sub>2</sub> (~3,6 ton/año)	<a href="https://es.ollital.com/">https://es.ollital.com/</a>
Aceros Otero (Otero & Domínguez)	Chile	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Cañerías y accesorios para H <sub>2</sub>	<a href="https://oteroindustrial.cl/?srsltid=AfmBOopyfKn3qaNQW2uzuGJ3QEoYTWPXuuzroB3swBhzQo-TJORAGsC">https://oteroindustrial.cl/?srsltid=AfmBOopyfKn3qaNQW2uzuGJ3QEoYTWPXuuzroB3swBhzQo-TJORAGsC</a>
Danus Conexiones SPA	Chile	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Cañerías, válvulas, mangueras, instrumentación, etc.	<a href="https://www.danus.cl/wp/?srsltid=AfmBOoq3Xdi5PLvTatcNqfgJTH_8Mmrcr_-pFzqfLqazadwcD4Zeimte">https://www.danus.cl/wp/?srsltid=AfmBOoq3Xdi5PLvTatcNqfgJTH_8Mmrcr_-pFzqfLqazadwcD4Zeimte</a>
D-Lok	Corea del Sur	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Conexiones y válvulas para H <sub>2</sub>	<a href="http://d-lok.com/contant.php?num=4_1">http://d-lok.com/contant.php?num=4_1</a>
HyLok	Corea del Sur	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Conexiones, válvulas y mangueras para H <sub>2</sub>	<a href="https://www.hylokusa.com/">https://www.hylokusa.com/</a>
Pietro Fiorentini SpA	Italia	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Válvulas y reguladores de presión para H <sub>2</sub>	<a href="https://www.fiorentini.com/en/">https://www.fiorentini.com/en/</a>
Swagelok	EE.UU.	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Válvulas, reguladores, conexiones para H <sub>2</sub>	<a href="https://www.swagelok.com/es">https://www.swagelok.com/es</a>
WIKA Chile SpA	Alemania / España	Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados	Instrumentación (sensores de presión, etc.)	<a href="https://www.wika.com/es-cl/pagina_inicial.WIKA">https://www.wika.com/es-cl/pagina_inicial.WIKA</a>
Energía y Medioambiente Combustión, S.L.	España	Consumo de hidrógeno y derivados para generación de calor o combustión	Quemador de hidrógeno modulante	<a href="https://emcombustion.es/">https://emcombustion.es/</a>
Horizon	República Checa	Consumo de hidrógeno y derivados para generación de electricidad	Celda de Combustible/PEM	<a href="https://www.horizoneducational.com/">https://www.horizoneducational.com/</a>
H2E Technologies Co.	Ltd	Consumo de hidrógeno y derivados para generación de electricidad	Celda de Combustible/PEM	<a href="https://h2etech.en.made-in-china.com/">https://h2etech.en.made-in-china.com/</a>
GreenHub	Estados Unidos	Consumo de hidrógeno y derivados para generación de electricidad	Celda de Combustible/PEM	<a href="https://greenhub.eu/">https://greenhub.eu/</a>

## 13 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.

### 13.1 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.

#### 13.1.1 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.

#### 13.1.2 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.

## 13.2 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.

## 13.3 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.

## 13.4 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.

## 13.5 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 puede lograrse mediante la incorporación de estos servicios en bases de licitación y programas públicos, el establecimiento de convenios marco con instituciones estratégicas, la difusión técnica dirigida a empresas que desarrollan proyectos de investigación aplicada y la implementación de mecanismos de cofinanciamiento que reduzcan las barreras de acceso. Con estas acciones se genera un flujo sostenido de operaciones que respalda la viabilidad económica de la red y fomenta la adopción tecnológica a nivel nacional.

### 13.6 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.

## 13.7 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.

# 14 Bibliografía

- [1] H. C. a. M. & Company, «Hydrogen Insights 2023.» 2023. [En línea]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>.
- [2] 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](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf).
- [3] U. D. o. Energy, «Regional Clean Hydrogen Hubs.» 2023. [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>.
- [4] 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>.
- [5] I. E. A. (IEA), «Hydrogen Projects Database.» 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>.
- [6] 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](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf).
- [7] 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](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030.pdf).
- [8] I. E. A. (IEA), «Global Hydrogen Review 2023.» 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
- [9] 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](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/e5846471-328c-48fd-b91f-837da07556b6_en?filename=Clean%20Hydrogen%20JU%20AWP%202025_FINAL_ADOPTED.pdf).
- [10] «TeacHy 2020 Project.» 2020. [En línea]. Available: <http://www.teachy.eu/>.
- [11] 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](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper.pdf).
- [12] 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/USDOE/OCED/bulletins/37599bb7>.
- [13] 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](https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office?nrg_redirect=270099). [Último acceso: 2025].
- [14] 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-myp-2024.pdf>.
- [15] 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>.
- [16] Internationa Energy Agency (IEA), «US hydrogen workforce development programmes.» Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/policies/17838-us-hydrogen-workforce-development-programmes>.
- [17] A. S. E. K. J. E. (. Lina Li, «Hydrogen Factsheet - China.» Abril 2022. [En línea]. Available: <https://adelphi.de/system/files/mediathek/bilder/H2%20Factsheet%20China.pdf>.
- [18] 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>.
- [19] 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?](https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/Magallanes_White_Paper_Edicion_Feb20.pdf?)
- [20] E. B. A. Rubin, Research Methods for Social Work, Sage Publications, Inc., 2001.
- [21] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Green hydrogen supply: A guide to policy making.» 2021. [En línea]. Available: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA\\_Green\\_Hydrogen\\_Supply\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/May/IRENA_Green_Hydrogen_Supply_2021.pdf).
- [22] State of Green, «Green hydrogen is Danish hydrogen.» Noviembre 2023. [En línea]. Available: [https://stateofgreen.com/en/wp-content/uploads/2023/11/sog\\_greenhydrogen\\_WP\\_08\\_DIGI.pdf](https://stateofgreen.com/en/wp-content/uploads/2023/11/sog_greenhydrogen_WP_08_DIGI.pdf).
- [23] Organisation for Economic Co-operation and Development (OCDE), «Manual de Frascati.» 2015. [En línea]. Available: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/es/publications/reports/2015/10/frascati-manual-2015\\_glg57dcb/9789264310681-es.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/es/publications/reports/2015/10/frascati-manual-2015_glg57dcb/9789264310681-es.pdf).
- [24] Instituto Nacional de Estadística de Chile (INE), «ENCUESTA ANUAL SOBRE GASTO Y PERSONAL EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN EMPRESAS, ESTADO, EDUCACIÓN SUPERIOR E INSTITUCIONES PRIVADAS SIN FINES DE LUCRO.» Noviembre 2019. [En línea]. Available: [https://minciencia.gob.cl/legacy-files/ine\\_-\\_informe\\_sobre\\_la\\_metodologia\\_id\\_ano\\_ref\\_2018.pdf](https://minciencia.gob.cl/legacy-files/ine_-_informe_sobre_la_metodologia_id_ano_ref_2018.pdf).
- [25] Organisation for Economic Co-operation and Development (OCDE), «Manual de Oslo.» 2008. [En línea]. Available: <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001708.pdf>.
- [26] Ministerio de Hacienda de Chile, «Ley 20.241 Establece un Incentivo Tributario a la Inversión Privada en Investigación y Desarrollo.» 2008. [En línea]. Available: <https://bcn.cl/2k358>.
- [27] Ministerio de Hacienda, «Decreto 1523. Aprueba Nuevo Reglamento del Registro de Centros para la Realización de Actividades de Investigación o Desarrollo Bajo La Ley N° 20.241.» 2013. [En línea]. Available: <https://bcn.cl/>
- [28] Agencia Chile de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID), «APRUEBA BASES DE LICITACIÓN PÚBLICA Y DESIGNA COMITÉ DE EVALUACIÓN PARA LA CONTRATACIÓN DEL SERVICIO DE CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE PROPUESTA TÉCNICA PARA EL FORTALECIMIENTO DEL EQUIPAMIENTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN TORNO AL HIDRÓGENO VERDE.» 2024. [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1gZMHnXD8QtAcnY8E2op3XRtHGYBz7pJ/view?usp=sharing>.
- [29] ChileValora, «ChileValora.» 2025. [En línea]. Available: <https://chilevalora.gob.cl/>.
- [30] S.-Y. Jiang, «Transition and innovation ecosystem - investigating technologies, focal actors, and institution in eHealth innovations.» *ELSEVIER*, 2022.
- [31] Congreso Nacional de Chile, «Ley N° 21.305 - Establece la Ley de Eficiencia Energética.» 2021. [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1157192>.
- [32] Ministerio de Hacienda de Chile, «Anteproyecto de la Estrategia Financiera frente al Cambio Climático.» 2024.
- [33] 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/s40807-025-00151-57>.
- [34] Hydrogen Council, «Hydrogen Insights.» Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf>.
- [35] 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-CEEP-2023-09.pdf>.
- [36] A. Khzouz, «Tools and Applications for Determining Hydrogen Production Cost,» *Energies*, vol. 13, no. 3783.» Jul. 2020.
- [37] NREL, «Lifecycle Cost Analysis of Hydrogen Versus Other Technologies,» *NREL/TP-46719*, 2010.
- [38] T. P. a. D. Schexnayder, «Major Equipment Life-cycle Cost Analysis,» *LRRB*, 2014.
- [39] A. B. Barros Souza Riedel, V. Feitosa Riedel, H. N. Souza Filho, E. P. da Silva, R. Marques Cabral, L. de Brito Silva y A. de Castro Pereira, «Technical-economic analysis of renewable hydrogen production from solar photovoltaic and hydro synergy in a pilot plant in Brazil,» *Energies*, vol. 17, n° 17, p. 4521, 2024.
- [40] Mazumder, Gour Chand; Shams, S. M. Nasif; Rahman, Md. Habibur; Huque, Saiful, «Production of Green Hydrogen in Bangladesh and its Levelized Cost,» *Dhaka University Journal of Applied Science*, vol. 6, n° 2, p. 64-71, 2021.
- [41] H. Power, «Denham Hydrogen Demonstration Project: Construction and Commissioning Report (Milestone 3),» Horizon Power, Karratha, Australia, 2024.
- [42] E. T. Centre, «H2xport Pilot Plant.» QUT Science Energy Transition Centre, [En línea]. Available: <https://research.qut.edu.au/energytransition/h2xport-pilot-plant/#:~:text=use%20hydrogen%20by%20utilising%20two,of%20treated%20water%20for%20production>. [Último acceso: 03 07 2025].
- [43] A. Shiroudi, M. Deleuze y A. Mousavifar, «Efficiency analysis of a solar photovoltaic array coupled with an electrolyzer power unit: A case study,» *International Journal of Ambient Energy*, pp. 1-26, 2015.
- [44] h2eg.com, «h2eg.com.» H2 Energy Group, [En línea]. Available: <https://h2eg.com/h2-view-news-brazil-to-gain-new-8m-green-hydrogen-production-project/#:~:text=With%20an%20investment%20of%20R%2445m,contain%20a%201000kWp%20photovoltaic%20plant>. [Último acceso: 03 07 2025].
- [45] HyResource, F. F. CRC, A. H. Council y CSIRO, «Denham Hydrogen Demonstration Plant,» HyResource, 14 03 2025. [En línea]. Available: <https://research.csiro.au/hyresource/denham-hydrogen-demonstration-plant/#:~:text=Estimated%20cost%3A>. [Último acceso: 03 07 2025].
- [46] IRENA, «Renewable power generation costs in 2023,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.

- [47] F. Novacheck, K. Harrison, G. Martin, T. Ramsden y W. Kramer, «The Wind-to-Hydrogen Project: Operational Experience, Performance Testing, and Systems Integration www.nrel.gov.» 03 2009. [En línea]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy09osti/44082.pdf>. [Último acceso: 03 07 2025].
- [48] K. Harrison, R. Remick, G. Martin y A. H. (R. Canada), «Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries.» *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, pp. 13-14, 2010.
- [49] R. E. World, «Village» to Demonstrate Wind Powered Hydrogen Production.» *Renewable Energy World*, 25 04 2005. [En línea]. Available: <https://www.renewableenergyworld.com/energy-storage/village-to-demonstrate-wind-powered-hydrogen-production-27219/>. [Último acceso: 03 07 2025].
- [50] phys.org, «NREL, Xcel energy sign wind to hydrogen research agreement.» *National Renewable Energy Laboratory*, 08 05 2006. [En línea]. Available: <https://phys.org/news/2006-05-nrel-xcel-energy-hydrogen-agreement.html>. [Último acceso: 03 07 2025].
- [51] SII, «sii.cl.» 2003. [En línea]. Available: [https://www.sii.cl/valores\\_y\\_fechas/tabla\\_vida\\_util\\_activo\\_inmovilizado.html](https://www.sii.cl/valores_y_fechas/tabla_vida_util_activo_inmovilizado.html).
- [52] Servicio médico Legal, «Mercado Público.» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mercadopublico.cl/PurchaseOrder/Modules/PO/DetailsPurchaseOrder.aspx?qs=OwEKoI9n7a7TawGdC7Bqg==>.
- [53] ISL, [En línea]. Available: <https://www.mercadopublico.cl/PurchaseOrder/Modules/PO/DetailsPurchaseOrder.aspx?qs=t6FDbg2sMvxWPE/4DJ0o2w==>.
- [54] ISL, 2018. [En línea]. Available: <https://mercadopublico.cl/PurchaseOrder/Modules/PO/DetailsPurchaseOrder.aspx?qs=EPBD5vifEpygaxH75NOFG==>.
- [55] ISL, «Mercado Público.» 2025. [En línea]. Available: <https://www.mercadopublico.cl/PurchaseOrder/Modules/PO/DetailsPurchaseOrder.aspx?qs=U8FuqInGBmCsLx6oLyd6ww==>.
- [56] INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE, «Mercado Público.» [En línea]. Available: <https://mercadopublico.cl/PurchaseOrder/Modules/PO/DetailsPurchaseOrder.aspx?qs=rW8fwRcbQaRfkbBa7yk+w==>.
- [57] International Energy Agency, «Ammonia technology roadmap.» 2021. [En línea]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf>.
- [58] G. R.-G. J. R. V. a. B. G. Guillermo de la Hera, «Flexible Green Ammonia Production Plants: Small-Scale Simulations Based on Energy Aspects.» *Enviroments*, 2024.
- [59] Yanmar Power Technology Co., 2024. [En línea]. Available: [https://www.yanmar.com/global/about/ygc/news/2024/01/09/128584.html?utm\\_source](https://www.yanmar.com/global/about/ygc/news/2024/01/09/128584.html?utm_source).
- [60] BeHydro, [En línea]. Available: <https://www.behydro.com/test-contentbuilder>.
- [61] JCB, «jcb.com.» [En línea]. Available: <https://www.jcb.com/en-us/campaigns/hydrogen/hydrogen%20generator>.
- [62] Anglo Belgian Corporation, 2020. [En línea]. Available: <https://4echile.cl/videos/webinar-uso-de-hidrogeno-como-combustible-en-motores-de-combustion-interna/>.
- [63] UK Department for Energy Security and Net Zero, Consultation\_on\_a\_business\_model\_for\_low\_carbon\_hydrogen, 2023.
- [64] Department of Energy - Estados Unidos, «Fuel Cell Technologies Subprogram Overview.» 2024. [En línea]. Available: <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review24/2024-amr-07-fuel-cell-technologies.pdf>.
- [65] KPMG, «How to evaluate the cost of the green hydrogen business case?.» [En línea]. Available: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/be/pdf/2022/hydrogen-industry-1.pdf>.
- [66] GIZ, ARIEMA Energía y Medioambiente S.I, y TCI Gecomp SpA, «Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para la entidad GNA.» 2021. [En línea]. Available: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/09/Produccion-y-costos-H2-GNA.pdf>.
- [67] CENTRO DE ENERGÍA, fcm U. de Chile, USACH y PUC, «Principales características del motor de cálculo de Costo Nivelado de Producción de Hidrógeno.» 2024. [En línea]. Available: <https://hidrogenorenovableenc.exploradorenergia.cl/wp-content/uploads/2024/04/Motor-Calculo-LCOH-Principales-Caracteristicas-20240411.pdf>.
- [68] Nuclear Energy Agency - EE.UU., «ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT.» 1998. [En línea]. Available: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r97-13-1.pdf>.
- [69] K. T. Y. F. M. B. G. P. S. C. a. C. Q. Z. John Moreland, «Interactive Simulators for Steel Industry Safety Training.» 2018. [En línea]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/srin.201800513>.
- [70] H.-S. H. M. S. & B. F. Erin Burk, «Effectiveness of simulator training compared to machine training for equipment operators in the logging industry.» *Abril* 2023. [En línea]. Available: [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/2023/ja\\_2023\\_smidt\\_001.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/2023/ja_2023_smidt_001.pdf).
- [71] «Clean Hydrogen JOINT UNDERTAKING (Clean Hydrogen JU).» 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](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/e5846471-328c-48fd-b91f-837da07556b6_en?filename=Clean%20Hydrogen%20JU%20AWP%202025_FINAL_ADOPTED.pdf).
- [72] Clean Hydrogen Joint Undertaking, «PROGRAMME REVIEW REPORT 2024.» 2024. [En línea]. Available: [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/6b6584d0-f259-436a-8fe8-3a6bf9d0761c\\_en?filename=20242823\\_PDF\\_EGAA2400IENN\\_002.pdf](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/6b6584d0-f259-436a-8fe8-3a6bf9d0761c_en?filename=20242823_PDF_EGAA2400IENN_002.pdf).
- [73] N. A. Safiye Turgay, «Maximizing Efficiency and Cost Savings through Digital Twin Simulation: Optimizing Cellular Manufacturing.» 2023. [En línea].
- [74] Congressman Eric Sorensen, «Rock Falls Fire Department proposes \$1.5 million training facility.» pp. <https://sorensen.house.gov/media/in-the-news/rock-falls-fire-department-proposes-15-million-training-facility#:~:text=ROCK%20FALLS%20Ill,prepare%20firefighters%20for%20emergency%20situations>.
- [75] B. F. L. a. A. B. Kínzey, «NATIONAL TRAINING FACILITY FOR HYDROGEN SAFETY FIVE-YEAR PLAN FOR HAMMER.» 2003. [En línea]. Available: <https://www.h2tools.org/sites/default/files/2019-09/National%20Training%20Facility%20for%20Hydrogen%20Safety%20Five%20Year%20Plan%20for%20HAMMER.pdf#:~:text=Management%20and%20Emergency%20Response%20,establishe%20to%20provide%20critical%20training>.
- [76] ISO, [En línea]. Available: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/08/26/82660.html#:~:text=La%20norma%20ISO%2014687%20es,los%20motores%20de%20combust%20C3%B3n%20interna.>
- [77] Australian Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, «National-hydrogen-strategy-2024.» 2023.
- [78] European Clean Hydrogen Alliance, «LEARNBOOK: FINANCING OF HYDROGEN INFRASTRUCTURE.» [En línea]. Available: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en).
- [79] European Commission, «https://research-and-innovation.ec.europa.eu/» [En línea]. Available: [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en).
- [80] The Hydrogen Europe Quarterly Magazine, «PDF (hydrogeneurope.eu).» 2025. [En línea]. Available: [chrome-extension://efaidnbnmnbbpcjpcglclefindmkaj/https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2025/03/The-Hydrogen-Europe-Quarterly\\_10\\_DIGITAL.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnbbpcjpcglclefindmkaj/https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2025/03/The-Hydrogen-Europe-Quarterly_10_DIGITAL.pdf).
- [81] European Commission, «The Recovery and Resilience Facility.» [En línea]. Available: [https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility\\_en](https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_en).
- [82] European Commission, «https://ec.europa.eu/» Febrero 2024. [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_24\\_789](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_789).
- [83] European Commission, «IMPORTANT PROJECTS OF COMMON EUROPEAN INTEREST (IPCEIs).» [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_24\\_789](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_789).
- [84] NET Zerolnsight, «Mind the Gap: Venture Funding of Hydrogen Start-ups.» [En línea]. Available: [www.h2ub.com](http://www.h2ub.com).
- [85] CORFO, «Anillos Industriales Bio Bio CORFO.» 2025. [En línea]. Available: <https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/anillos-industriales-fomento-encadenamiento-productivo-biobio?sessionId=1tG71eK4pk8xos5V7z5I2CNQxQGRaJqAAMVNxB114KoLto8xMxsb12112870021-833481622>.
- [86] Delegation of the European Union to Chile, «Team Europe LACIF EIB KfW Platform.» 28 Marzo 2025. [En línea]. Available: [https://www.eeas.europa.eu/delegations/chile/chile-eu-eib-and-kfw-finance-renewable-hydrogen-projects-chile-%E2%82%AC2165-million\\_en?s=192](https://www.eeas.europa.eu/delegations/chile/chile-eu-eib-and-kfw-finance-renewable-hydrogen-projects-chile-%E2%82%AC2165-million_en?s=192).
- [87] CORFO, «CORFO Eureka.» 2024. [En línea]. Available: [https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/innova\\_alta\\_tecnologia\\_eureka](https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/innova_alta_tecnologia_eureka).
- [88] Fondo de Innovación para la Competitividad, [En línea]. Available: <https://fondos.gob.cl/searchernew/emprendimiento%20e%20innovaci%C3%B3n/>.
- [89] IBD, «https://bidlab.org/en.» [En línea]. Available: <https://bidlab.org/en/products/financing-products>.
- [90] European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency, «Cross-border renewable energy projects (CEF Energy).» [En línea]. Available: [https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/energy-infrastructure-connecting-europe-facility-0/cross-border-renewable-energy-projects-cef-energy-new\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/energy-infrastructure-connecting-europe-facility-0/cross-border-renewable-energy-projects-cef-energy-new_en).
- [91] 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>.
- [92] 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](https://enhanceuniversity.eu/wp-content/uploads/2024/12/ENHANCERIA_D6.3-Recommendations-on-sharing-RI-resources-within-ENHANCE.pdf).
- [93] 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](https://www.clustercollaboration.eu/sites/default/files/document-store/Policy_Brief_-_Clusters.pdf).
- [94] 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](https://www.clustercollaboration.eu/sites/default/files/2023-04/ECCPFactsheet_Korea_2022.pdf).

- [95] Transform 4 European Research and Innovation, «D2.7 Report on Barriers and Policy Recommendations for Joint Access to Research Infrastructure,» 2024. [En línea]. Available: [https://transform4europe.eu/wp-content/uploads/2025/01/T4ERI\\_D2.7\\_Report-on-Barriers-and-policy-recommendations.pdf](https://transform4europe.eu/wp-content/uploads/2025/01/T4ERI_D2.7_Report-on-Barriers-and-policy-recommendations.pdf).
- [96] Innovation, Science and Economic Development Canada, «INNOVATION SUPERCLUSTERS PROGRAM GUIDE,» 2017. [En línea]. Available: [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2017/isde-ised/lu4-214-1-2017-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2017/isde-ised/lu4-214-1-2017-eng.pdf).
- [97] World Bank Group, «Public-Private Partnership Reference Guide, Version 3,» 2017. [En línea]. Available: <https://ppp.worldbank.org/sites/default/files/2024-08/PPP%20Reference%20Guide%20Version%203.pdf>.
- [98] Department of Education - Australian Government, «National Collaborative Research Infrastructure Strategy 2025 Guidelines,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.education.gov.au/download/18962/national-collaborative-research-infrastructure-strategy-2025-guidelines/40584/document/pdf>.
- [99] M. d. Hacienda, «Ley 20.241 Establece un Incentivo Tributario a la Inversión Privada en Investigación y Desarrollo,» 2008. [En línea]. Available: <https://bcn.cl/2k358>.
- [100] T. Van de Graf, «La década del Hidrógeno. La carrera mundial por el hidrógeno limpio supone nuevas realidades e interdependencias geopolíticas,» *Finanzas & Desarrollo*, pp. 21-23.

## 15 Anexos

### Nomenclatura

AECID - Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

AGCID - Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

BCN - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

CAM - Consejo Asesor Ministerial del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA).

CH<sub>3</sub>OH - Metanol verde.

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono.

CORFO - Corporación de Fomento de la Producción.

DME - Dimetil éter.

DAC - Direct Air Capture (Captura directa de aire).

ECTT - Equipamiento científico, tecnológico y técnico.

ERNC - Energías renovables no convencionales.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional).

GLP - Gas licuado de petróleo.

H<sub>2</sub> - Hidrógeno.

Hidrógeno verde o hidrógeno renovable - Hidrógeno producido mediante procesos basados en energías renovables.

I+D - Investigación y desarrollo.

I+D+i - Investigación, desarrollo e innovación.

IES - Instituciones de educación superior.

INE - Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.

IPSFL - Instituciones privadas sin fines de lucro.

IRENA - International Renewable Energy Agency (Agencia Internacional de Energías Renovables).

LCOH - Levelized Cost of Hydrogen (Costo nivelado del hidrógeno).

MINCIENCIA - Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile.

MINEDUC - Ministerio de Educación del Gobierno de Chile.

MINERGA - Ministerio de Energía del Gobierno de Chile.

NH<sub>3</sub> - Amoníaco verde.

O<sub>2</sub> - Oxígeno.

OCDE - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

PEM - Membrana de intercambio de protones.

SAF - Sustainable Aviation Fuels (Combustibles sostenibles para aviación).

SEA - Servicio de Evaluación Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.

SOEC - Electrolizadores de óxido sólido.

## 15.1 Visitas nacionales

### 15.1.1 Gasvalpo

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>Gasvalpo spa es una empresa chilena dedicada a la distribución de gas natural por redes, operando principalmente en las regiones de Valparaíso y Coquimbo. Su foco está en brindar soluciones energéticas seguras, continuas y sustentables a clientes residenciales, comerciales e industriales. A lo largo de los años, ha desarrollado una infraestructura robusta y moderna, posicionándose como un actor relevante en el mercado energético del país.</p> <p>En el marco de su compromiso con la innovación y la transición energética, Gasvalpo ha comenzado a incorporar el hidrógeno verde en sus operaciones. A través del proyecto H<sub>2</sub>GN, la empresa busca integrar hidrógeno renovable en sus redes de distribución mediante la técnica de blending.</p>
<p><b>Gasvalpo Spa</b></p> <p><b>Fotos</b></p> <p><b>Electrolizador marca UTIS</b></p>  <p><b>Almacenamiento</b></p>  <p><b>Sistema de blending</b></p>  <p><b>Sitio web</b> <a href="https://www.gasvalpo.cl/">https://www.gasvalpo.cl/</a></p> <p><b>Contactos:</b> Harlan Simonetti - Jefe de Proyectos <a href="mailto:Hsimonetti@gasvalpo.cl">Hsimonetti@gasvalpo.cl</a></p>	<p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p> <p><b>Planta satélite de regasificación (PSR):</b> Instalación diseñada para almacenar gas natural en estado líquido (GNL) y transformarlo en gas para su distribución. En este caso, la planta cuenta con una capacidad de almacenamiento de 119.000 litros de GNL a una presión de 5,5 bar y una temperatura aproximada de -160 °C. El gas natural licuado se regasifica mediante un sistema de vaporización que eleva su temperatura hasta alcanzar condiciones ambientales. Posteriormente, se ajusta su presión a 4 bar para su inyección segura en la red de distribución.</p> <p><b>Electrolizador:</b> Marca UTIS modelo UCHP, utiliza tecnología PEM de 150kw. Capaz de producir 30 [Nm<sup>3</sup>/h] de H<sub>2</sub> a 40 [barg]. También produce 15 [Nm<sup>3</sup>/h] de oxígeno a la misma presión. Tiene un caudal máximo de entrada de agua de 160 [L/h] a 35[°C] máximo.</p> <p><b>Almacenamiento de H<sub>2</sub>:</b> Se utiliza un estanque de almacenamiento que retiene el hidrógeno a una presión entre 30-35[barg] otorgados por el mismo electrolizador.</p> <p><b>Sistema de blending:</b> El sistema de blending en este centro fue ingeniería y diseño propio de Gasvalpo en alianza con la empresa Pietro Fiorentini, es un sistema que permite la mezcla en condiciones seguras de hidrógeno con GN, el sistema contempla válvulas de control, flujómetros, cañerías de seguridad por sobrepresión, sistemas de control y medición analógicos y digitales entre otros.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p> <p><b>H<sub>2</sub>GN:</b> Proyecto piloto impulsado por Gasvalpo que introduce el uso de hidrógeno verde en las redes de distribución de gas natural mediante la técnica de blending, abasteciendo a más de 3800 clientes. El hidrógeno se produce localmente a través de electrólisis del agua utilizando energía renovable eólica que la empresa adquiere por medio de PPA, el hidrógeno se almacena y luego se mezcla en proporciones controladas con gas natural para su distribución en las comunas de Coquimbo y La Serena. Esta iniciativa busca reducir las emisiones de carbono del sistema energético sin requerir modificaciones en las instalaciones de los usuarios.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p> <p>En la planta de Gasvalpo, actualmente existen 6 personas que desempeñan actividades en la planta de Gasvalpo de los cuales sólo 1 persona está capacitada en materia de hidrógeno, que se dedica al operación, control, mantenimiento y levantamiento de requerimientos de la planta.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>El modelo de negocios de Gasvalpo se basa en la distribución de gas natural por redes a clientes residenciales, comerciales e industriales en distintas regiones de Chile. Su principal fuente de ingresos proviene del transporte y venta de gas, gestionando una infraestructura que incluye plantas satélites de regasificación, redes de distribución y sistemas de medición. Gasvalpo ha comenzado a diversificar su propuesta de valor integrando energías limpias, como el hidrógeno verde, a través de proyectos como H<sub>2</sub>GN, apuntando a un modelo energético más sostenible y alineado con los objetivos de descarbonización del país.</p> <p><b>CLIPPING</b></p> <p><b>Inicio de proyecto de inyección de H<sub>2</sub> a red de GN</b> <a href="#">Noticia</a></p> <p><b>Nueva Imagen Corporativa y Estrategia Energética</b> <a href="#">Gasvalpo cierra un gran año con nueva imagen corporativa y más energías - Asiva</a></p>

15.1.1.1 Fotografías Gasvalpo







## 15.1.2 QUEMPIN

 <p><b>QUEMPIN</b></p>	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>QUEMPIN Spa es Spin-off del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. QUEMPIN ha sido financiada por CORFO mediante el instrumento Crea y Valida con foco en Hidrógeno verde para Diseño y construcción "Central Térmica que utilice hidrogeno de forma segura", es decir, una planta de producción de hidrógeno verde para la combustión de hidrogeno cumpla con los requerimientos de calidad y seguridad que impone la Superintendencia de Electricidad y combustible (SEC).</p> <p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p> <p><b>Electrolizador:</b> Marca NEL modelo H4, utiliza tecnología PEM. Capaz de producir 4 [Nm<sup>3</sup>/h] de H<sub>2</sub> a 15 [bar].</p> <p><b>Almacenamiento de H<sub>2</sub>:</b> Se utiliza un compresor marca AEROTECNICA COLTRI spa H<sub>2</sub> BOOSTER RC 4 [kW] que puede comprimir hasta 200 [bar] un estanque marca Toyota Tsusho tipo IV de 190 litros de volumen de agua, equivalente a 2,88 [kg] de hidrogeno.</p> <p><b>Uso de H<sub>2</sub>:</b> Quemador de aire forzado que utiliza hidrogeno como combustible de 60kw de potencia térmica, para el calentamiento de un horno isotérmico.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p> <p><b>Pebetero Olímpico de combustión GLP - Hidrógeno verde:</b> Proyecto certificado y autorizado por la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC)</p> <p><b>Proyecto Crea Valida 23CV-247099:</b> QUEMPIN: Central térmica que utiliza hidrogeno de forma segura.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p> <p>QUEMPIN spa cuenta con 2 Ingeniero Civiles Mecánico con certificación como Instalador de Hidrogeno SEC Clase 5. Es decir, que cuentan con una licencia como instalador de gas Clase 1, experiencia comprobada en el rubro y un diploma que acredite formación en hidrogeno de 28 horas académicas.</p> <p><b>Cristóbal Monzó Hevia</b> - Ingeniero de Desarrollo <a href="mailto:Cristobal.monzo@QUEMPIN.cl">Cristobal.monzo@QUEMPIN.cl</a></p> <p><b>Enzo Saavedra Ferrari</b> - Gerente técnico <a href="mailto:Enzo.saavedra@QUEMPIN.cl">Enzo.saavedra@QUEMPIN.cl</a></p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>QUEMPIN ha podido conseguir financiamiento mediante fondos concursables de Investigación y Desarrollo, provenientes de CORFO principalmente. Sin embargo, ha podido tener ventas asociadas al hidrógeno para generar proyectos demostrativos y consultorías especializadas en Hidrógeno.</p> <p><b>CLIPPING</b></p> <p><b>Pebetero Olímpico Santiago 2023</b> <a href="https://www.portalminero.com/wp/academicos-chilenos-desarrollan-la-lama-del-pebetero-olimpico-en-base-a-hidrogeno-verde-y-energia-solar/">https://www.portalminero.com/wp/academicos-chilenos-desarrollan-la-lama-del-pebetero-olimpico-en-base-a-hidrogeno-verde-y-energia-solar/</a></p> <p><b>Estudio sobre planta de Hidrógeno Verde</b> <a href="https://usm.cl/noticias/ministerio-de-energia-visita-instalaciones-de-planta-de-produccion-de-hidrogeno-verde-en-la-usm/">https://usm.cl/noticias/ministerio-de-energia-visita-instalaciones-de-planta-de-produccion-de-hidrogeno-verde-en-la-usm/</a></p>
<p><b>QUEMPIN Spa</b></p> <p><b>Fotos</b></p> <p><b>Electrolizador marca NEL H4</b></p> 	
<p><b>Quemador QUEMPIN H<sub>2</sub></b></p> 	
<p><b>Estación de acumulación de H<sub>2</sub></b></p> 	
<p><b>Sitio web</b> <a href="https://QUEMPIN.cl/">https://QUEMPIN.cl/</a></p> <p><b>Contactos:</b> <b>Mario Toledo Torres</b> - presidente del Directorio <a href="mailto:mario.toledo@usm.cl">mario.toledo@usm.cl</a> <b>Nicolás Becker</b> - Gerente General <a href="mailto:nicolas.becker@QUEMPIN.cl">nicolas.becker@QUEMPIN.cl</a></p>	

15.1.2.1 Fotografías QUEMPIN







### 15.1.3 Centro Nacional de Pilotaje (CNP)

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>CNP es corporación privada sin fines de lucro, que surge a partir de un programa de fortalecimiento y creación de capacidades tecnológicas de Corfo. Actualmente, cuenta con una planta de hidrógeno verde, para la generación máxima de 1,5[kg/día], pero condiciones de ambientales es 0.7 [kg/día] el cual comprime y almacenado en un rack de cilindros transportable por vehículo, para finalmente alimentar unas celdas de combustible de 5,7[kW] que alimentan eléctricamente oficina del CNP. Adicionalmente, tiene un convenio de colaboración para pilotajes con la Minera San Pedro, la cual venden concentrado de cobre.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PLANTA hidrógeno verde</b></p> <p><b>Electrolizador:</b> Marca ENAPTEREL 4.0, utiliza tecnología Alcalino. Capaz de producir 0.5 [kg/día] de H<sub>2</sub> a 35 [bar]. Cuentan con 3 unidades de electrolizadores.</p> <p><b>Almacenamiento de H<sub>2</sub>:</b> Se utiliza un estanque de fibra de carbono, tipo de estanque clase 4 marca MAHYTEC de 850L (2.4kg H<sub>2</sub> a 35 [bar]) para presión máxima de 60 [bar].</p> <p><b>Celdas de Combustible:</b> Consumo de 5,7kw marca GENSURE, 3 unidades, modelos E-2500, E-2200X y E1000XE fabricado por PLUG POWER.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p> <p><b>"Aceleradora de Hidrógeno Verde" de la Agencia de Sostenibilidad Energética (Agencia SE) del Ministerio de Energía:</b> Proyecto para financiamiento de construcción y puesta en marcha de la planta y contar con la autorización de Superintendencia de Electricidad y Combustibles como del Sernageomin</p> <p><b>Piloto para combustión sostenible con hidrógeno verde para la minería en Chile:</b> La iniciativa, impulsada por Lipigas, Sun Solutions y Reduce, recibió un subsidio Corfo y contará con el respaldo del Centro Nacional de Pilotaje de Tecnologías para la Minería y Parque Científico Tecnológico de la Región de Antofagasta.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p> <p>Actualmente, cuenta con su ingeniería de Proyecto. Ingeniería en Física de la USACH.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>CNP es corporación privada sin fines de lucro, que realiza pilotajes para tecnologías incipientes en el ámbito de la minería. Por lo que, cobra a empresas que quieran probar sus tecnologías en un ambiente real minero, permitiendo escalar su TRL. Adicionalmente, postula a distintos fondos concursables y participa en alianzas públicas-privadas, asociado a la innovación tecnológica en minería.</p> <p><b>CLIPPING</b></p> <p><b>Ministro de Energía inaugura primera planta piloto de hidrógeno verde para minería en TIL-TIL</b> <a href="https://pilotaje.cl/ministro-de-energia-inaugura-primera-planta-piloto-de-hidrogeno-verde-para-mineria-en-til-til-y-se-anuncian-dos-nuevos-proyectos/">https://pilotaje.cl/ministro-de-energia-inaugura-primera-planta-piloto-de-hidrogeno-verde-para-mineria-en-til-til-y-se-anuncian-dos-nuevos-proyectos/</a></p> <p><b>Alianza público-privada presenta el primer bus a hidrógeno hecho en Chile</b> <a href="https://pilotaje.cl/alianza-publico-privada-presenta-el-primer-bus-a-hidrogeno-hecho-en-chile/">https://pilotaje.cl/alianza-publico-privada-presenta-el-primer-bus-a-hidrogeno-hecho-en-chile/</a></p>
<p><b>Centro Nacional de Pilotaje CNP</b></p>	
<p><b>Fotos</b></p> <p><b>Rack de electrolizadores ENAPTER</b></p> 	
<p><b>Celdas de Combustibles</b></p> 	
<p><b>Estación de acumulación de H<sub>2</sub></b></p> 	
<p><b>Sitio web</b> <a href="https://pilotaje.cl/">https://pilotaje.cl/</a></p> <p><b>Contactos:</b> Natalia González Mayegas - Ingeniera de proyectos <a href="mailto:Ngonzalez@pilotaje.cl">Ngonzalez@pilotaje.cl</a></p>	

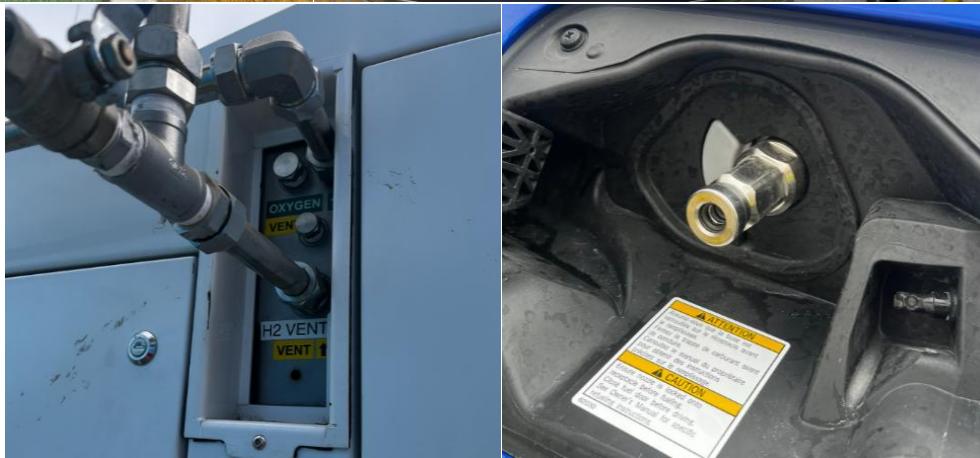
15.1.3.1 Fotografías CNP



## 15.1.4 Toyota

 <b>TOYOTA</b>	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>Toyota Chile tiene un fuerte compromiso con la sustentabilidad, alineándose con el Desafío Ambiental 2050 de Toyota Global, cuyo objetivo es reducir a cero las emisiones de CO<sub>2</sub> en todo el ciclo de vida de sus vehículos y operaciones. Este plan incluye la neutralidad de carbono, la eficiencia en el uso del agua, la economía circular y la conservación de la biodiversidad.</p> <p>La empresa trabaja para ofrecer soluciones de movilidad sostenibles, promoviendo tecnologías como los vehículos híbridos y de hidrógeno. También impulsa acciones en sus operaciones internas, buscando minimizar el impacto ambiental mediante el reciclaje, la eficiencia energética y el uso responsable de recursos.</p> <p>Además, Toyota en Chile colabora con instituciones, empresas y comunidades locales para fomentar una movilidad más limpia y responsable, educando y creando conciencia sobre el cuidado del medio ambiente.</p>
<p><b>TOYOTA CHILE S.A.</b></p>	<p><b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p>
<p><b>Fotos</b> <b>Toyota Mirai</b></p> 	<p><b>Electrolizador:</b> Marca Plug Power, utiliza tecnología PEM. Capaz de producir 9,5 [Nm<sup>3</sup>/h] o 20 kg/día de H<sub>2</sub> a 25 [bar].</p> <p><b>Compresor de H<sub>2</sub>:</b> Encargado de elevar la presión del hidrógeno para su almacenamiento, con una presión de entrada de 20-30 [barg] y una presión de salida de 400 [barg]. Cuenta con un sistema Booster Fill, que permite aumentar la presión de carga hasta 700 [barg] en el tanque del vehículo.</p> <p><b>Almacenamiento:</b> Compuesto por 5 cilindros, cada uno con una capacidad de 41,6 [litros] y una presión máxima de 511 [barg]. El hidrógeno se almacena en ellos a una presión de 400 [barg]. Permite almacenar 5,6 [kg] en total.</p> <p><b>Dispensador:</b> El hidrógeno se carga utilizando una tobera SAE J2601/4. La presión de salida es de 400 [barg] directamente desde el sistema de almacenamiento, y puede alcanzar los 700 [barg] mediante el sistema de compresión Booster Fill, para llenar el tanque del vehículo. Permite llenar el vehículo en aproximadamente 10-15 minutos.</p> <p><b>Uso final -Toyota Mirai:</b> Vehículo ligero que funciona mediante el uso de celda de combustible de 133 [kW] o 180 [HP] de potencia, cuenta con 3 estanque de almacenamiento que a máxima carga almacenan hidrógeno a 700 [barg] equivalente a 5,6 [kg] de H<sub>2</sub>.</p>
<p><b>Estación de Carga de 700bar</b></p>	<p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p>
	<p><b>Planta de hidrógeno Toyota Chile:</b> El proyecto consiste en la construcción de una planta de generación de hidrógeno destinada a abastecer un dispensador para vehículos Toyota Mirai, ubicado dentro de las mismas instalaciones. El objetivo es producir 20 [kg] de hidrógeno por día, con un consumo eléctrico máximo de 117 [kVA] y una potencia nominal de 87,5 [kW].</p>
<p><b>Sistema completo Toyota Mirai</b></p>	<p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p>
	<p>Actualmente, Toyota Chile cuenta con menos de 10 personas capacitadas para realizar tareas básicas relacionadas con el manejo de hidrógeno en el Toyota Mirai, incluyendo protocolos de carga, operación del vehículo y procedimientos de emergencia. Sin embargo, aún no dispone de especialistas en hidrógeno, por lo que se está desarrollando un plan de capacitaciones para fortalecer la formación del capital humano en la planta.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>El modelo de negocios de Toyota Chile asociado al proyecto Mirai se basa en introducir progresivamente tecnologías de movilidad sustentable, posicionando a Toyota como pionero en el uso de vehículos a hidrógeno en América Latina. A través de una estrategia de innovación, alianzas estratégicas (como con Copec Voltex para infraestructura de carga) y colaboración con organismos públicos, el Mirai se presenta como un proyecto demostrativo que busca preparar el ecosistema para una futura comercialización. Este enfoque está alineado con el Desafío Ambiental 2050 de Toyota, integrando la sustentabilidad como eje central del negocio y fortaleciendo su liderazgo en tecnologías limpias.</p>
<p><b>Sitio web</b></p>	<p><b>CLIPPING</b></p>
<p><a href="https://toyota.cl/">https://toyota.cl/</a></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">Plataforma de Electromovilidad - Vehículos livianos de pasajeros con celdas de hidrógeno</a></li> <li>• <a href="#">Toyota inaugura la primera planta de producción de hidrógeno en sus instalaciones - La Tercera</a></li> </ul>
<p><b>Contactos:</b></p>	
<p>Eduardo Madariaga - Jefe de desarrollo de nuevos negocios</p>	

15.1.4.1 Fotografías Toyota



## 15.1.5 Highly Innovative Fuels (HIF)

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>La HIF Global es la principal empresa de e-Fuels a nivel mundial, con proyectos en distintas regiones para producir combustibles a partir de energía renovable, hidrógeno verde y CO<sub>2</sub> reciclado.</p> <p>Su nombre refleja su misión: ofrecer Highly Innovative Fuels para avanzar en la descarbonización del planeta. Su objetivo es convertirse en el mayor productor de e-Fuels del mundo, alcanzando los 150.000 barriles diarios para 2035, capturando más de 25 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> y transformando 5 millones de vehículos.</p> <p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p>
<h3>Highly Innovative Fuels (HIF)</h3>	<p><b>Turbina generación eólica:</b> Marca SIEMENS, capacidad de generación eléctrica de 3,4 MW.</p> <p><b>Electrolizador:</b> Marca SIEMENS, utiliza tecnología PEM de 1,2 MW. Capaz de producir 20,5 [kg/h] de H<sub>2</sub> a 35 [bar].</p> <p><b>DAC (No instalado):</b> Direct Air Capture, equipo no instalado actualmente, permitirá la captura de CO<sub>2</sub> desde el aire. Capacidad de generar 150kg/h de CO<sub>2</sub></p> <p><b>Generador de e-Metanol:</b> Ingreso de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> a 60-80 bar, con eficiencia del 80%. Produce un e-Metanol crudo con 36% de agua, debe ser reprocesado para eliminar impurezas</p> <p><b>Generador de e-Gasolina (MTG):</b> Marca ExxonMobil. Methanol to Gasoline (MTG) es un reactor que opera a 380°C y presión de 5 bar, aproximadamente el 50% del metanol que ingresa se convierte en gasolina, el otro 50% es agua. Este proceso genera distintas calidades de gasolina, las cuales deben pasar por algunos subprocesos químicos para obtener el producto final.</p> <p><b>Cromatógrafos:</b> Marca perkinelmer. Equipos utilizados en laboratorio para control de calidad de procesos y productos. Estos equipos permiten medir pureza, partículas, hidrocarburos, alcoholes, agua, presión de vaporización, entre otras características clave para la caracterización del proceso y productos de la planta.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p>
<p><b>Fotos</b></p> <p><b>Aero generador y estanque de almacenamiento de H<sub>2</sub></b></p>  <p><b>Generador de e-Metanol</b></p>	<p><b>Haru Oni:</b> Primera planta de e-Fuels en operación a nivel mundial. Utiliza energía eólica y electrólisis para producir hidrógeno verde, el cual se combina con CO<sub>2</sub> capturado de una fuente biogénica mediante un proceso de síntesis. Así se generan e-Fuels como gasolina sintética verde (e-Gasoline) y gas licuado sintético verde (e-LG).</p> <p>Es una planta piloto con capacidad por diseño de 130.000 L/año de e-gasolina. Se considera un ciclo de vida de 25 años.</p> <p>En 2024 exportó cerca de 76.000 litros de e-gasolina.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p>
 <p><b>Almacenamiento de e-Gasolina</b></p>	<p>El personal en planta corresponde a 25 personas con diversos cargos necesarios para la operación de la planta, en su mayoría ingenieros y cerca del 80% ingenieros mecánicos.</p> <p>El personal en laboratorio corresponde a 6 personas, 5 analistas y 1 analista senior jefe de laboratorio. El laboratorio cumple la función de control de calidad y mejora continua de procesos de la planta.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p>
	<p>El modelo de negocios de HIF está orientado a la exportación y se apalanca en alianzas estratégicas con actores globales como Porsche, EIG, AME y Baker Hughes, quienes aportan capital, tecnología y mercado. Haru Oni actúa como planta demostrativa para validar la tecnología y escalar futuros proyectos, bajo una lógica de replicabilidad y eficiencia operativa, con el objetivo de posicionar a HIF como proveedor líder de combustibles sintéticos a nivel global.</p> <p><b>CLIPPING</b></p> <p><a href="#">News - HIF Global</a></p>
<p><b>Sitio web</b></p> <p><a href="https://hifglobal.com/">https://hifglobal.com/</a></p> <p><b>Contactos:</b></p> <p><b>Clara Vezzani Pesutic</b> - Communications Coordinator HIF Chile</p> <p><a href="mailto:Clara.vezzani@hifglobal.com">Clara.vezzani@hifglobal.com</a></p>	

15.1.5.1 Fotografías HIF



## 15.2 Visitas internacionales


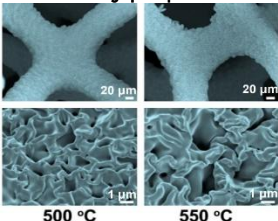
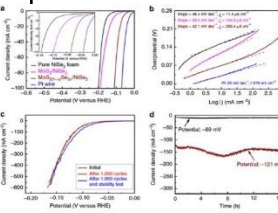
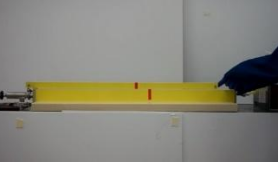
### 15.2.1 Universidad de Texas en Austin (UA)

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>La Universidad de Texas en Austin es una de las instituciones académicas más prestigiosas de Estados Unidos y un referente global en investigación, innovación y formación superior. Fundada en 1883, University of Texas cuenta con más de 50.000 estudiantes y 3.000 profesores. UT Austin se destaca particularmente en ingeniería, ciencias naturales y políticas públicas, y mantiene estrechas colaboraciones con la industria, el gobierno y organizaciones internacionales.</p> <p>El J.J. Pickle Research Campus es el principal centro de investigación aplicada de la Universidad de Texas en Austin. Es sede de instalaciones clave como el Texas Advanced Computing Center (TACC) y el Hydrogen Proto-Hub, posicionándose como un entorno estratégico para la innovación tecnológica, la colaboración con la industria y la demostración de soluciones energéticas sostenibles y proyectos de gran escala.</p> <p><b>EQUIPAMIENTO PRINCIPAL - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p>
<p><b>The University of Texas at Austin</b></p> <p><b>Fotos</b></p> <p><b>Generador de H<sub>2</sub> - MSR</b></p>  <p><b>Compresor y estanques</b></p>  <p><b>Usos finales Toyota Mirai &amp; Fuel Cell</b></p>  <p><b>Sitio web</b> <a href="https://www.uatx.org/">https://www.uatx.org/</a></p> <p><b>Contactos:</b> Michael Lewis - Director del centro de electromecánica Mclewis@cem.utexas.edu</p>	<p><b>Generación de hidrógeno por reformado de metano:</b> Cuentan con dos reformadores de metano por vapor con una capacidad combinada de 80[kg/día] de hidrógeno, producido con metano reciclado proveniente de vertederos.</p> <p><b>Compresión:</b> El sistema de compresión de la instalación permite elevar la presión del hidrógeno hasta 350 [barg] que es la presión a la que se almacena.</p> <p><b>Almacenamiento:</b> Permite almacenar 45kg de hidrógeno a 350[barg] aproximadamente. El almacenamiento está compuesto por 3 estanques tipo 1 de 0,6[m<sup>3</sup>] cada uno, teniendo un total de 1,8[m<sup>3</sup>] de hidrógeno a 350[barg].</p> <p><b>Estación de carga:</b> El sistema de recarga de hidrógeno marca PDC Machines, modelo SF-70-20-COM, es una unidad compacta que produce, almacena, acondiciona y dispensa hidrógeno de alta pureza mediante electrólisis, con una capacidad de producción de [1.0 a 9.5 Nm<sup>3</sup>/h]. Opera con una alimentación eléctrica de [480 VCA], [3 fases], [60 Hz], y utiliza agua desionizada de alta pureza (consumo nominal de [9.5 L/h]). El hidrógeno se almacena a [400 barg] y puede ser dispensado hasta [700 barg] mediante el sistema de compresión Booster Fill, lo que permite cargar vehículos como el Toyota Mirai en aproximadamente [10 a 15 minutos] usando una tobera estándar SAE J2601/4.</p> <p><b>Uso final -Toyota Mirai:</b> Vehículo ligero que funciona mediante el uso de celda de combustible de 133 [kW] o 180 [HP] de potencia, cuenta con 3 estanque de almacenamiento que a máxima carga almacenan hidrógeno a 700 [barg] equivalente a 5,6 [kg] de H<sub>2</sub>.</p> <p><b>Uso final - Celdas de combustible:</b> Celdas de combustible marca powercellution. La universidad utiliza celdas de combustible para suministrar energía eléctrica a un centro de computación avanzada. Las celdas de combustible tienen una potencia de 100kw de generación eléctrica.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p> <p><b>Hydrogen Proto-Hub:</b> Ubicado en el campus de investigación J.J. Pickle, este centro produce hidrógeno libre de carbono mediante electrólisis del agua, utilizando energía solar y eólica, así como reformado de gas natural renovable proveniente de vertederos de Texas. El hidrógeno generado alimenta una celda de combustible estacionaria que suministra energía limpia al Texas Advanced Computing Center y abastece de combustible a vehículos eléctricos de celda de combustible Toyota Mirai y drones. Este enfoque integra múltiples fuentes de hidrógeno renovable y diversos usos finales en una sola ubicación, demostrando un ecosistema de hidrógeno escalable y económico.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p> <p>Cuentan con personal calificado para la operación y mantenimiento de la planta. Se planea utilizar la planta para entrenamiento de estudiantes y de profesionales para manejo de instalaciones de hidrógeno</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>La Universidad de Texas en Austin (UT Austin), como universidad pública de investigación, tiene un modelo de negocios basado en una combinación de financiamiento estatal, matrículas, donaciones privadas, subvenciones federales, y convenios con la industria. Su enfoque se centra en la generación y transferencia de conocimiento, con una fuerte orientación hacia la innovación aplicada y la colaboración interdisciplinaria.</p> <p>En el ámbito del hidrógeno, UT Austin se asocia estratégicamente con agencias gubernamentales como el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE), así como con empresas del sector energético, tecnológico y de transporte.</p> <p><b>CLIPPING</b></p> <p>UT Austin Noticias en hidrógeno - <a href="#">Hydrogen Resources and News   Energy Institute</a></p>

15.2.1.1 Fotografías Universidad de Texas en Austin (UA)



## 15.2.2 Universidad de Houston (UH)

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>La Universidad de Houston es una institución pública líder en investigación con fuerte enfoque en energía, innovación y sostenibilidad. A través del Energy Transition Institute (ETI) y la iniciativa UH Energy, impulsa proyectos clave en producción, almacenamiento y uso de hidrógeno limpio, promoviendo la colaboración entre academia, industria y gobierno. Además, ofrece programas educativos como el Hydrogen Economy Program, reforzando su rol como actor estratégico en el desarrollo del ecosistema del hidrógeno y la transición energética de EE.UU.</p> <p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p>
<p><b>University of Houston</b></p> <p><b>Fotos</b></p> <p><b>Catalizador de espuma de NiSe<sub>2</sub>: estructura y propiedades</b></p> 	<p><b>Electrolizador:</b> Sistema rediseñado con arquitectura modular para operación eficiente en medios alcalinos y ácidos. Condiciones operativas de 1-6 M KOH y 25-60 °C, consumo energético de ~46 kWh/kg H<sub>2</sub>. Diseño modular, baja sobretensión y alta eficiencia de liberación de gases.</p> <p><b>HER (Hydrogen Evolution Reaction):</b> Espuma de NiSe<sub>2</sub> con superficie rugosa, alta porosidad y excelente conductividad.</p> <p><b>OER (Oxygen Evolution Reaction):</b> Compuestos como nife-LDH/Ni y S-foeoh/Ni en mallas de níquel.</p> <p><b>Catalizador híbrido:</b> El catalizador híbrido MoS<sub>2</sub>(1-x) Se<sub>2</sub>x soportado sobre espuma de NiSe<sub>2</sub> presenta una actividad electrocatalítica cercana al platino, con una mejora significativa respecto a sus componentes individuales. Esto lo posiciona como una alternativa rentable y de alto rendimiento, optimizada para la electrólisis en medios ácidos.</p> <p><b>Membranas:</b> Las membranas de intercambio aniónico y bipolares permiten una separación eficiente entre HER y OER, con alta conductividad iónica y resistencia mecánica mejorada.</p> <p><b>Sistema de Análisis PVT (Presión-Volumen-Temperatura)</b> Desarrollado por Core Laboratories, diseñado para la caracterización avanzada de fluidos bajo condiciones extremas de presión y temperatura. Este sistema de alta precisión está montado en una estructura de seguridad con bastidor de aluminio y paneles de protección, lo que permite su operación segura en entornos de laboratorio. Este sistema permite estudiar el comportamiento de fluidos en condiciones extremas, siendo clave para investigaciones en almacenamiento de hidrógeno, secuestro de CO<sub>2</sub>, aprovechamiento geotérmico y caracterización de hidrocarburos. Su capacidad de operar hasta [200 °C] y en alta presión lo convierte en una herramienta esencial para la transición energética.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p>
<p><b>Desempeño HER del sistema híbrido MoS<sub>2</sub>/NiSe<sub>2</sub> comparado con referencia de platino</b></p> 	<p><b>Energy Transition Institute (ETI):</b> Este instituto impulsa investigaciones avanzadas en producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno, abordando desafíos clave para integrar el hidrógeno en la matriz energética.</p> <p><b>Project SHOWPLACE (Storing Hydrogen from Offshore Wind Power for Load-balancing and Carbon Elimination):</b> Iniciativa que busca establecer la viabilidad comercial de combinar la energía eólica marina con la generación y almacenamiento de hidrógeno. Un componente clave de este proyecto es la utilización del exceso de energía eólica para producir agua dulce mediante desalinización, que posteriormente se emplea en la electrólisis para generar hidrógeno. Esta estrategia permite aprovechar infraestructuras offshore existentes y optimizar el uso de recursos renovables.</p> <p><b>Proyecto ROICE (Repurposing Offshore Infrastructure for Clean Energy):</b> Esta iniciativa explora la reutilización de infraestructuras petroleras en el Golfo de México para generar energía e hidrógeno verde, extendiendo la vida útil de estas instalaciones y reduciendo la huella de carbono.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p>
<p><b>Sistema levitado superconductor: visión de integración energética</b></p> 	<p>En los laboratorios el capital humano contaba con protocolos de seguridad, prevención de riesgos y de emergencias, sin embargo, no contaba con una certificación específica para el manejo de hidrógeno o de uso de los instrumentos utilizados en el laboratorio. El personal calificado era un número inferior a 10 personas.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>La Universidad de Houston (UH) opera bajo un modelo de negocios mixto que combina financiamiento estatal y federal, matrículas, subvenciones competitivas, alianzas con la industria y generación de propiedad intelectual. Su enfoque está centrado en la investigación aplicada, especialmente en sectores estratégicos como energía, salud e ingeniería, y mantiene una fuerte vinculación con el sector productivo a través de iniciativas como UH Energy y el Energy Transition Institute.</p> <p><b>CLIPPING</b></p>
<p><b>Sitio web</b></p> <p><a href="https://www.uh.edu/">https://www.uh.edu/</a></p> <p><b>Contactos:</b></p> <p>Deidra M. Perry - Executive Director of Educational Programs <a href="mailto:Dperry@Central.UH.EDU">Dperry@Central.UH.EDU</a></p>	<p>Apartado de hidrógeno en portal de la universidad</p> <p><a href="https://www.uh.edu">UH - University of Houston</a></p> <p>Investigaciones de UH en materia de hidrógeno</p> <p><a href="https://www.uh.edu/uh-energy-innovation/uh-energy/energy-centers/eti/research/hydrogen/index.php">https://www.uh.edu/uh-energy-innovation/uh-energy/energy-centers/eti/research/hydrogen/index.php</a></p>

15.2.2.1 Fotografías Universidad de Houston (UH)



### 15.2.3 Socalgas

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p><b>Socalgas</b> (Southern California Gas Company) es una de las empresas de distribución de gas natural más grande de Estados Unidos, con más de 150 años de trayectoria y servicio a aproximadamente 22 millones de consumidores en California. Su modelo de negocios se basa en la entrega segura y confiable de gas natural, mientras impulsa una transición energética hacia fuentes más limpias. En este contexto, socalgas lidera iniciativas innovadoras como H<sub>2</sub> Home, un proyecto que integra hidrógeno verde en sistemas residenciales para calefacción, cocina y agua caliente.</p> <p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p>
<p><b>Socalgas</b></p> <p><b>Fotos</b></p> <p><b>Electrolizador marca NEL</b></p>  <p><b>Sistema de blending</b></p>  <p><b>Almacenamiento de hidrógeno</b></p>  <p><b>Celda de combustible</b></p>  <p><b>Sitio web</b>  <a href="https://www.socalgas.com/">https://www.socalgas.com/</a></p> <p><b>Contactos:</b>          Yuri Freedman - Senior Director, Business Development  <a href="mailto:Yfreedman@socalgas.com">Yfreedman@socalgas.com</a></p>	<p><b>Sistema de generación fotovoltaica y baterías:</b> Paneles fotovoltaicos tienen una potencia de 70[kW], el sistema de baterías tiene una capacidad de almacenar 280[kWh].</p> <p><b>Electrolizador:</b> Marca NEL de 62[kW] de potencia con tecnología PEM. Tiene capacidad de producir 1[kg/h] y alcanzar una presión de 30[bar]</p> <p><b>Almacenamiento de H<sub>2</sub>:</b> La capacidad de almacenamiento de la planta es de 11[kg] de hidrógeno en un estanque tipo 1.</p> <p><b>Sistema de blending:</b> Sistema automático que permite la mezcla de hidrógeno y GN según sea programado en la sala de control.</p> <p><b>Uso final - Celda de combustible:</b> La celda de combustible es de 4kw con tecnología PEM.</p> <p><b>Uso final - Combustión en casa:</b> Los artefactos de la casa han sido probados en laboratorio y no requieren de modificaciones para mezclas de hasta 20% de hidrógeno. La casa también cuenta con una caldera mural para calentamiento de agua y calefacción que es capaz de operar con 100% hidrógeno.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p> <p><b>H<sub>2</sub>Home:</b> Proyecto que busca demostrar cómo el hidrógeno verde puede integrarse de manera segura y eficiente en hogares residenciales. La iniciativa consiste en una casa la cual funciona con hidrógeno verde como fuente energética, es decir, toda la energía eléctrica de la casa proviene de una celda de combustible, mientras que la combustión que se produce en la casa (cocina, calefón, otros) funciona con una mezcla de entre 2-20% de hidrógeno verde. Si bien, el proyecto alimenta 1 sola vivienda, la capacidad de esta Microred, permite alimentar unas 100 viviendas equivalentes.</p> <p><b>Angeles Link</b> es un ambicioso proyecto propuesto por socalgas para desarrollar una de las redes de hidrógeno verde más grandes de Estados Unidos. El objetivo es construir un sistema de transporte de hidrógeno renovable que conecte zonas de producción en California con centros de consumo estratégicos, como los puertos de Los Ángeles y Long Beach, industrias, plantas eléctricas y el sector transporte.</p> <p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p> <p>Se cuenta con personal calificado para la operación. El mantenimiento es ejecutado por los mismos proveedores de los equipos. El departamento de bomberos está instruido en cómo reaccionar ante una situación de riesgo con hidrógeno. El personal en planta capacitado para la operación no supera las 10 personas.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>El modelo de negocios de socalgas se basa en la distribución de gas natural a través de una red subterránea en California, con cerca de 22 millones de clientes. En cuanto a su proyecto de hidrógeno, este se plantea como una iniciativa demostrativa que busca posicionar a la empresa como líder en innovación. El proyecto H<sub>2</sub>Home es considerado técnicamente viable, aunque no económicamente rentable por el momento. Por ello, el enfoque actual está en demostrar la seguridad del uso del hidrógeno en entornos domiciliarios.</p> <p><b>CLIPPING</b></p> <p><b>Proyecto H<sub>2</sub>-Home</b>  <a href="#">[H<sub>2</sub>] Innovation Experience   socalgas</a></p> <p><b>Proyecto Los Angeles Link</b>  <a href="#">Socalgas Seeks to Advance Angeles Link - A Clean Renewable Hydrogen System   socalgas</a></p>

15.2.3.1 Fotografías socialgas



## 15.2.4 Nacional Renewable Energy Laboratory (NREL)

 <p>NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY</p>	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>Es el principal laboratorio de investigación del Departamento de Energía de EE.UU. Dedicado al desarrollo de energías renovables, eficiencia energética y tecnologías sostenibles. NREL lidera investigaciones avanzadas en áreas como energía solar, eólica, almacenamiento, redes inteligentes y combustibles limpios, incluyendo el hidrógeno verde. A través de sus instalaciones de vanguardia y colaboración con gobiernos, academia e industria, NREL impulsa la innovación tecnológica para acelerar la transición hacia una matriz energética baja en carbono.</p>
<h3>Nacional Renewable Energy Laboratory - NREL</h3> <p><b>Fotos</b> Flatirons Campus Hydrogen System <i>(De la web)</i></p> 	<p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p> <p>NREL abarca toda la cadena de valor del hidrógeno, desarrollando no solo tecnologías y equipamiento para producción, almacenamiento, distribución y uso, sino también trabajando en la mejora de condiciones operativas, materiales avanzados, optimización de procesos y aplicaciones prácticas en movilidad, industria y redes energéticas. Además, desarrolla herramientas de modelamiento, simulación y evaluación técnica y económica que permiten escalar proyectos con mayor precisión y eficiencia.</p> <p>Considerando el proyecto Long scale Hydrogen, NREL cuenta con:</p> <p><b>Electrolizador:</b> Cuenta con 1,25 MW de potencia con tecnología PEM.</p> <p><b>Almacenamiento 1:</b> Almacenamiento de hidrógeno en estanques tipo 1 con capacidad de 600[kg] de hidrógeno a 200[barg].</p> <p><b>Almacenamiento 2:</b> Almacenamiento de hidruros metálicos, con capacidad de 520[kg] a una presión de 40[barg].</p> <p><b>Celda de combustible:</b> Marca Toyota 1MW de potencia.</p> <p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b> <b>Flatirons Campus Hydrogen System:</b> Proyecto de hidrógeno verde de 1,25MW de potencia de electrólisis desarrollado por el NREL en su campus Flatirons forma parte de la plataforma ARIES (Advanced Research on Integrated Energy Systems), y busca demostrar la viabilidad técnica y operativa de la producción, almacenamiento y uso de hidrógeno verde en gran escala.</p>
<p><b>Celda de combustible 1 MW (De la web)</b></p> 	<p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p> <p>NREL cuenta con aproximadamente 300 investigadores de los cuales cerca de 1/3 trabajan de forma remota. Todo el personal que realiza trabajos experimentales cuenta con capacitación para realizar sus actividades de manera segura.</p> <p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p> <p>El NREL opera como un laboratorio nacional del Departamento de Energía de EE.UU., con un modelo de negocios basado en financiamiento federal y colaboraciones con más de mil socios de la industria, academia y gobiernos. Su foco está en generar conocimiento, validar tecnologías y facilitar su transferencia al mercado, sin fines comerciales. En el ámbito del hidrógeno, NREL impulsa proyectos a lo largo de toda la cadena de valor, desde la producción hasta el uso final, actuando como un puente entre la investigación aplicada y la implementación real de soluciones energéticas limpias</p>
<p><b>Esquema resumen de la planta (De la web)</b></p> 	<p><b>CLIPPING</b></p> <p>Áreas de I+D <a href="#">Research   Hydrogen and Fuel Cells   NREL</a></p>
<p><b>Sitio web</b> <a href="https://www.nrel.gov/">https://www.nrel.gov/</a></p> <p><b>Contactos:</b> Riccardo Brachio - Senior International Program Manager <a href="mailto:Riccardo.Bracho@nrel.gov">Riccardo.Bracho@nrel.gov</a></p>	

### 15.2.4.1 Fotografías NREL



## 15.2.5 Luisiana State University (LSU)

	<p><b>RESUMEN</b></p> <p>LSU ofrece una sólida formación en ingeniería, energía, ciencias ambientales, biotecnología y agricultura. Tiene un fuerte enfoque en innovación aplicada y colabora estrechamente con la industria energética, especialmente en temas como transición energética, captura y almacenamiento de carbono (CCUS) e hidrógeno limpio. A través de centros como el LSU Center for River Studies y el Craft &amp; Hawkins Department of Petroleum Engineering, la universidad impulsa proyectos estratégicos que combinan sostenibilidad, tecnología y desarrollo económico regional.</p> <p><b>EQUIPOS PRINCIPALES - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b></p>
<p><b>Luisiana State University</b></p>	<p><b>Reactor químico de petróleo:</b> Reactor electroquímico capaz de convertir metano en etileno y otros hidrocarburos, generando hidrógeno como subproducto. El sistema emplea una celda electroquímica con un cátodo de cobre y un ánodo de óxido metálico, permitiendo extraer hidrógeno del metano sin emitir CO<sub>2</sub>. Esta tecnología representa una alternativa más limpia y eficiente frente al reformado convencional.</p>
<p><b>Fotos</b></p>	<p><b>Cromatógrafo:</b> Marca Shimadzu modelo Nexis GC-2030. Es un cromatógrafo de gases avanzado, diseñado para ofrecer alta precisión, sensibilidad y facilidad de uso. Cuenta con configuraciones flexibles de inyectores y detectores, y tecnología que simplifica el mantenimiento. Es ideal para análisis complejos en diversas industrias, garantizando resultados reproducibles y cumplimiento normativo.</p>
<p><b>Reactor químico de torre</b></p>	<p><b>Sistema de secuestro de carbono:</b> El sistema de captura de carbono desarrollado por el laboratorio PERTT de LSU se basa en un pozo de investigación a escala real diseñado para simular condiciones operativas de inyección y almacenamiento subterráneo de CO<sub>2</sub>. Este pozo permite a investigadores y estudiantes observar y analizar el comportamiento del dióxido de carbono en entornos que replican el subsuelo profundo, lo cual es fundamental para el desarrollo y validación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS).</p>
	<p><b>PROYECTOS EMBLEMÁTICOS</b></p>
<p><b>Cromatógrafo</b></p>	<p><b>Centro de Innovación Energética en LSU:</b> Con el apoyo de una donación de Shell, LSU estableció el Instituto de Innovación Energética, enfocado en estudios sobre hidrógeno, captura de carbono y combustibles de bajo carbono, además de desarrollar soluciones para la fuerza laboral y políticas relacionadas.</p>
	<p><b>Almacenamiento subterráneo de hidrógeno:</b> Busca identificar y evaluar sitios potenciales para el almacenamiento subterráneo de hidrógeno en Luisiana, apoyando los esfuerzos de descarbonización industrial del estado.</p>
<p><b>Sistema de secuestro de carbono</b></p>	<p><b>Investigación en producción de hidrógeno limpio:</b> Explora métodos alternativos y más económicos para producir hidrógeno limpio, contribuyendo a la reducción de emisiones de carbono en procesos industriales.</p>
	<p><b>PERSONAL CALIFICADO</b></p>
<p><b>Sitio web</b></p>	<p>LSU cuenta con gran cantidad de personal calificado para el uso de hidrógeno y sustancias en distintas condiciones de presión y temperatura. Gran parte del personal docente cuenta con experiencia en industria, y el enfoque de la universidad también va muy alineado con la preparación a nivel industrial de los estudiantes. Existen protocolos para la operación segura de los equipos bajo la supervisión de los encargados de cada uno de los laboratorios.</p>
<p><b>Contactos:</b> Brad Ives - Director ejecutivo <a href="mailto:Bradives@lsu.edu">Bradives@lsu.edu</a></p>	<p>No se cuenta con certificación específica para manejo de hidrógeno en específico.</p>
	<p><b>MODELO DE NEGOCIOS</b></p>
	<p>El modelo de negocios de LSU en torno al hidrógeno se basa en la investigación aplicada, la colaboración público-privada y el desarrollo de infraestructura experimental para posicionarse como un referente en innovación energética. A través de iniciativas como el Instituto de Innovación Energética, proyectos de producción y almacenamiento de hidrógeno, y su participación en clústeres como H<sub>2</sub>theFuture, LSU busca impulsar tecnologías limpias, atraer inversión, formar capital humano especializado y apoyar la descarbonización industrial del estado de Luisiana. Además, mantiene una estrecha relación con las principales empresas de combustibles de la región, como Shell, Exxonmobil y otras del corredor industrial del Golfo,</p>
	<p><b>CLIPPING</b></p>
	<p><b>Investigación en almacenamiento de grandes cantidades de H<sub>2</sub></b></p>
	<p><a href="#">LSU PETE Professor Receives IEF Grant for Hydrogen Storage Sites Research</a></p>
	<p><b>Instituto de innovación en energía de LSU</b></p>
	<p><a href="#">LSU Institute for Energy Innovation</a></p>

15.2.5.1 Fotografías LSU



## 16 Talleres de validación de resultados

Los talleres tuvieron como objetivo corroborar y enriquecer la propuesta preliminar de priorización de equipamiento necesario para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile, integrando las perspectivas de los actores clave de ciencia, tecnología e innovación a nivel nacional. A lo largo de este proceso, se combinaron actividades individuales y grupales, apoyadas en encuestas previas y dinámicas de discusión estructurada, con el fin de capturar la experiencia concreta de quienes lideran proyectos, regulan políticas o forman capital humano en torno al hidrógeno verde.

### 16.1 Resultados de los talleres asociados a identificación de brechas en equipamiento

Los talleres de validación, realizados en modalidad presencial y virtual, contaron con una participación de 72 personas de distintos sectores y constituyeron una etapa clave del estudio, ya que permitieron contrastar y enriquecer colectivamente los hallazgos obtenidos en fases previas mediante encuestas, entrevistas y visitas a terreno. A través de estas instancias se buscó incorporar la experiencia y conocimiento de actores estratégicos del ecosistema de ciencia, tecnología, formación y desarrollo industrial en torno al hidrógeno verde y sus derivados.

Los resultados que se presentan a continuación recogen las opiniones, comentarios y priorizaciones realizadas por los participantes.

#### 1. Corto plazo (hasta 2027)

- **Electrolizadores:** Varios participantes coincidieron en que disponer de electrolizadores para I+D+i es importante, pero no todos los grupos enfatizaron la misma urgencia. En algunos casos se señaló que otros elementos (por ejemplo, instrumentación analítica) podrían considerarse más prioritarios según la región.
- **Sistemas de acondicionamiento:** Mientras que un grupo destacó la necesidad de compresores y secadores como pieza clave para cerrar la cadena experimental, otros asistentes sugirieron que, dado el costo de estos equipos, tal vez convendría en primera instancia reforzar la disponibilidad de analítica y almacenamiento antes de invertir en compresión.
- **Instrumentación analítica:** Hubo consenso en que los laboratorios nacionales carecen de cromatógrafos de gas y equipos térmicos, pero algunos participantes manifestaron que sería útil explorar opciones de acceso compartido (préstamo interinstitucional) en lugar de adquirir equipos en cada centro.
- **Bancos de prueba formativos:** Durante la discusión, varios institutos de formación insistieron en que, sin bancos de prueba, la formación técnica no se ajusta a la realidad. Sin embargo, otros señalaron que, antes de montar bancos complejos, convendría reforzar capacitaciones en seguridad y procedimientos operativos.

#### 2. Mediano plazo (hasta 2030)

- **Reactores de síntesis de derivados:** Algunos asistentes coincidieron en que es esencial incorporar reactores químicos para metanol y amoníaco, mientras que otros recordaron que, actualmente, incluso los laboratorios de nivel universitario están lejos de tener recursos básicos y que quizá primero debiera fortalecerse la base analítica y de almacenamiento.
- **Software de simulación y diseño:** La mayoría reconoció la brecha en herramientas digitales; no obstante, un par de participantes advirtió que, sin cierto nivel de infraestructura física, el software resulta difícil de aprovechar plenamente.
- **Equipos de uso final a escala representativa:** Mientras unos defendieron la compra de celdas y motores de mediana potencia, otros opinaron que sería preferible asociarse

con industrias piloto para realizar validaciones conjuntas en terreno, en lugar de adquirir equipos individuales en cada centro.

### 3. Largo plazo (2030 en adelante)

- **Laboratorios modulares distribuidos:** Varios grupos compartieron la visión de descentralizar capacidades, pero otros comentaron que, sin un plan de financiamiento sostenible, el mantenimiento de múltiples sedes podría resultar impracticable.
- **Parques de prueba semiindustriales:** La idea de instalaciones de escala industrial o semiindustrial recibió apoyos y reservas: algunos asistentes piensan que, para validar en condiciones reales, estas plantas son indispensables, mientras que otros plantearon que sería mejor consolidar proyectos piloto existentes antes de escalar a ese tamaño.
- **Redes de colaboración y consorcios:** Muchos coincidieron en la conveniencia de compartir infraestructura, pero se planteó que, sin incentivos claros, es difícil lograr compromisos a largo plazo. Además, se resaltó en gran medida la necesidad de establecer vínculos entre el ecosistema investigador y la industria.

### 4. Comentarios transversales

- Varios participantes señalaron la importancia de incluir análisis de ciclo de vida y aspectos de propiedad intelectual en las versiones finales de la propuesta, aunque otros consideraron que esos temas quizá queden fuera de este nivel de priorización y deban tratarse en una fase posterior.
- Se mencionó la escasez de personal con experiencia práctica y la falta de certificaciones sectoriales. Algunos asistentes recomendaron centrarse primero en dotar de equipamiento formativo, mientras que otros sugirieron diseñar simultáneamente los cursos de capacitación y los laboratorios correspondientes.
- El financiamiento fue discutido en todas las sesiones, con opiniones divergentes sobre si conviene apostar por incentivos fiscales, alianzas público-privadas o estrategias mixtas.

## 16.2 Resultados de los talleres asociados a la propuesta de Red Nacional de Colaboración en I+D+i en hidrógeno verde y derivados.

Los talleres de cierre del estudio permitieron validar los principales lineamientos para la conformación de la red nacional de colaboración en hidrógeno verde, con una participación de 58 personas y generando un espacio de discusión técnica e institucional orientado a proyectar su estructura, objetivos y mecanismos de operación. Las sesiones reunieron a representantes de instituciones de investigación, desarrollo e innovación, organismos públicos y actores del sector productivo, quienes aportaron desde sus distintas experiencias a la definición de una hoja de ruta común.

El trabajo se organizó en torno a cuatro ejes principales. El primero correspondió a la definición de los objetivos de la red, enfocados en articular capacidades, optimizar el uso de infraestructura y fomentar proyectos colaborativos de validación tecnológica. El segundo eje abordó la identificación y caracterización de los participantes que integrarían la red, considerando instituciones con capacidades científicas, tecnológicas y técnicas relevantes en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados. El tercer eje, relativo a la gobernanza y coordinación, fue el que generó mayor debate entre los participantes. En una primera propuesta se incluían las instituciones que podrían asumir responsabilidades específicas dentro de la estructura de gobernanza; sin embargo, tras el intercambio de visiones y observaciones durante los talleres, se optó por reformular este componente hacia una versión más abierta, orientada a un proceso futuro y participativo que permita definir los roles y mecanismos de coordinación de manera progresiva y consensuada. Finalmente, el cuarto eje trató la sostenibilidad de la red, destacando la importancia de asegurar su continuidad mediante fuentes de

financiamiento estables, una estructura administrativa clara y la alineación con las políticas públicas de innovación y energía.

En conjunto, los talleres de cierre no solo consolidaron los resultados del estudio, sino que también sentaron las bases para una etapa posterior de desarrollo, en la que la red nacional de colaboración evolucione hacia un modelo operativo sostenible, flexible y representativo de la diversidad de actores que conforman el ecosistema del hidrógeno verde en Chile.

### 16.3 Tabla de Entrevistas estructurada

Técnica de recolección de información cualitativa que consideró un total de 9 categorías y sus correspondientes subcategorías, las cuales se describen a continuación:

N°	Categorías	Codificación	Subcategoría
1	Fuentes de energías renovables (ER)	EFER	1. Costos ER
			2. Logística de ER
			3. Desafíos de Producción de ER
2	Infraestructura para hidrógeno verde (carbono neutral)	EIH2V	1. Necesidades y problemáticas de infraestructura
3	Equipamiento para hidrógeno verde (carbono neutral)	EEH2V	1. Necesidades y problemáticas de equipamiento
4	hidrógeno verde y su potencial carbono neutral	EH2VPCN	1. Economía carbono neutral
5	Proyectos de sostenibilidad de los Centros	EPSC	1. Necesidades y problemáticas de personal calificado.
			2. Necesidades y problemáticas técnicas (I+D+i).
			3. Necesidades y problemáticas económicas.
			4. Necesidades y problemáticas sociales.
			5. Necesidades y problemáticas ambientales
6	Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación	EPH2VDE	1. Desarrollo de capacidades y tecnologías para exportación
			2. Desafíos de infraestructura habilitante para exportación
7	Desafíos de Escalabilidad de Proyectos de hidrógeno verde (necesidades y problemáticas NP)	EDEPH2V	1. NP Inversiones y coordinación múltiples actores involucrados
			2. NP adquisición d infraestructura y equipamiento producción hidrógeno verde a gran escala
			3. NP ante funcionamiento del equipamiento
			4. NP incompatibilidades infraestructura con respecto a equipamientos adquiridos
8	Formación Técnica- Profesional y Entrenamiento de Personal	EFTPEP	1. NP para asesorías y/o formación especializada en hidrógeno verde
			2. Formación especializada relevante
9	Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con hidrógeno verde	EGIH2V	1. NP para redes, coordinaciones y gestiones

### 16.3.1 Matriz descriptiva a la categoría Fuentes de Energías Renovables (EFER)

Codificación	Categorías	Subcategorías	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EFER	Fuentes de energías renovables (ER)	1. Costos de ER	(1) No está alineado el costo con el plan del país.
			(2) La instalación eléctrica para poder alimentar un electrolizador, sistema de extracción de gases, compresor, sistema de refrigeración y detector de fugas fue bastante costoso.
			(3) Se evalúa que está bastante avanzado con los paneles solares. El precio ha disminuido considerablemente para el suministro e instalación de paneles solares.
			(4) Ha avanzado bastante la disponibilidad de energía renovable a nivel de la red, la infraestructura en general ha bajado los costos y por lo tanto baja los capex
		2. Logística de ER	(1) Baja calidad en la energía eléctrica ya que no nos asegura su procedencia.
			(2) Nuestra instalación cuenta con un sistema de paneles fotovoltaicos on-grid, es decir cuentan con fuentes renovables, pero no sabemos su real aporte al sistema de hidrógeno.
			(3) Para nuestro caso, para mantención es difícil encontrar proveedores, debido a que es una pequeña estación. Por lo que se hace todo por personal del CNP.
		3. Desafíos de Producción de ERNC	(1) Mejorar la eficiencia de los electrolizadores
			(1) Mejorar costos de energía eléctrica
			(1) Mejorar infraestructura para la distribución
			(2) Trazabilidad de la energía de fuentes renovables, saber cuánto y cómo impacta los paneles fotovoltaicos a la producción de hidrógeno verde.
			(2) Luego, la capacidad de instalar mayor producción de fuentes renovables en nuestra posición. Creemos tener una buena fuente de energía solar en el verano, sin embargo, no basta para la producción anual.
			(2) El transporte del hidrógeno producido y como almacenar dicha energía para un correcto ciclo de producción de hidrógeno verde, junto con el dinamismo y control de la producción en función de las condiciones, es un desafío en el largo plazo
			(2) El desafío principal es la inclusión de nuevas formas de producción de energía renovables y el control de la producción de energía según la etapa del año y disponibilidad energética para la producción. En ese sentido, el control inteligente de las fuentes principales y ponerlas a disposición de la producción de hidrógeno debería ser el ámbito para estudiar y desarrollar.
			(3) Creemos que el desafío principal para la producción de energía renovable será adaptarse a climas cada vez más extremos.
			(4) Promover mecanismos de financiamiento orientados en movilidad, costos de infraestructura bajarán y por lo tanto también bajará el LCOH (costo nivelado de hidrógeno)
			(4) Iniciativas por parte del estado de Chile con respecto a materia de hidrógeno verde.
			(5) La distribución y coordinación de las fuentes. Más allá de la construcción de plantas generadoras, para el año 2030 la distribución de energía sería el principal desafío.

### 16.3.2 Matriz descriptiva a la categoría Infraestructura para hidrógeno verde, carbono neutral (EIH2V)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
--------------	------------	--------------	--

EIH2V	Infraestructura para hidrógeno verde (carbono neutral)	1. Necesidades y problemáticas de infraestructura	(1) Para avanzar en la descarbonización hay que aumentar la demanda de energías más limpias, mejorar la infraestructura
			(2) El alto costo de una instalación de hidrógeno para su uso, en comparación a fuentes convencionales como el GLP. Estamos hablando de una diferencia de 25 a 1. El costo principal está en el electrolizador, tecnología que debe reducir su precio si es que quiere acercarse a una instalación de gas o petróleo.
			(2) Necesario avanzar en estudios donde el hidrógeno sea competitivo y conocer quienes pagarán un mayor valor de un producto hecho por energía descarbonizada
			(4) Hay que reforzar y actualizar los planes estratégicos nacionales del hidrógeno verde y la generación eléctrica renovable

### 16.3.3 Matriz descriptiva a la categoría Infraestructura para hidrógeno verde, carbono neutral (EEH2V)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EEH2V	Equipamiento para hidrógeno verde (carbono neutral)	1. Necesidades y problemáticas de equipamiento	(1) Invertir en tecnología.
			(2) Nuestro equipamiento es para procesos térmicos, la cual no es competitivo en comparación a combustibles convencionales, sin embargo, el estudio de casos específicos y documentarlos ayudaría a levantar las problemáticas específicas a cada industria.
			(2) Chile, lamentablemente está alejado de la industria manufacturera de equipamiento del hidrógeno, lo cual genera graves problemas en la continuidad de la instalación de una planta, particularmente por la carencia de personal calificado.
			(3) Algunas de las complejidades que hemos tenido es la poca disponibilidad de proveedores. La mayoría del equipamiento son proveedores en el extranjero. Además, actualmente hay una sobre demanda de electrolizadores, es decir, si quisiéramos ampliar la cantidad de electrolizadores, entraríamos en una lista de espera para conseguir estos equipos.
			(3) Hemos tenido problemas en conseguir empresas especializadas en la mantención de los equipos presentes en la planta de hidrogeno. Ejemplo, solo existe la empresa TRA, pero la mantención de los compresores, no hemos tenido la posibilidad de encontrar algún proveedor.
(3) Sin estos contactos, se hace muy difícil avanzar en ampliar el equipamiento de nuestro centro.			

### 16.3.4 Matriz descriptiva a la categoría hidrógeno verde y su potencial carbono neutral (EH2VPCN)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EH2VPCN	hidrógeno verde y su potencial carbono neutral	1.Economía carbono neutral	(1) Hay muchos desafíos por delante, el plan nacional considera la descarbonización total en el año 2050.
			(1) Importante es hacer leyes que permitan la ejecución de proyectos que aceleren la descarbonización
			(2) Si Chile quiere ser carbono neutral al 2030, es clave potenciar la formación de capital humano avanzado en dicha materia.
			(2) El hidrógeno debe ser considerado como un gas libre de impuesto, de tal manera de incentivar la generación y uso de este en la economía. Considero que debería utilizarse en todos los ámbitos posible para tener una economía del hidrogeno madura
			(4) Para el año 2030 no se alcanzará una economía 100% descarbonizada

### 16.3.5 Matriz descriptiva a la categoría Proyectos de sostenibilidad de los Centros (EPSC)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EPSC	Proyectos de sostenibilidad de los Centros	1. Necesidades y problemáticas en materia de personal calificado.	(1) Actualizar mallas de universidades, no considerando carreras específicas
			(1) Insertar cursos específicos que abarquen las temáticas del hidrógeno verde y sus derivados
			(2) El personal calificado debe seguir siendo entrenado para la instalación y mantención de los equipos. Capaz de poder modificar y remodelar una instalación de hidrógeno para fines comerciales que lo ameriten.
			(2) Necesario un plan para la capacitación en distintas áreas del conocimiento a profesionales del ámbito de la ingeniería, científico y humanistas para poder dar herramientas al negocio del hidrogeno.
			(3) No existe programa de capacitación especial para plantas de hidrógeno verde. Solo existen programas de hidrogeno en general. Creemos que sacar la licencia de instalador de hidrogeno (SEC Clase 5), es problemático, debido a que hay que cumplir con 25 horas de capacitación en hidrogeno. Por lo que, implica pagar por dicho curso y por la licencia.
			(3) La escasez de personal técnico calificado es la principal necesidad.
			(4) Capital humano como pilar fundamental.
			(4) Entrenar actuales profesionales y no generar nuevas carreras o especializaciones.
			(5) No hay personal calificado. Pueden tener experiencia en proyectos, pero falta más certificación, diplomas, certificaciones, licencias.
			(5) Falta de personal en laboratorio, transporte por tuberías, cuesta encontrar gente capacitada.
			(5) Cuota de género, falta participación de mujeres
			(1) Elevados costos energéticos, de materiales y de equipos

		<p>2. Necesidades y problemáticas en aspectos técnicos (I+D+i).</p>	<p>(2) Actualmente, los proyectos de financiamiento de instalación de plantas de hidrógeno quedan sin un respaldo en el tiempo.</p> <p>(2) La mantención y optimización del uso del hidrógeno es un tema que aún no se ha abordado.</p> <p>(3) El principal problema es realizar los mantenimientos acordes al fabricante por especialistas en dichos equipos. Todos los proveedores de equipamiento de hidrógeno se encuentran en el extranjero por lo que la búsqueda de proveedores es complicada</p> <p>(3) Los procesos de regularización son lentos y complejos tanto con SERNAGEOMIN como también con la SEC. Especialmente, para esta industria que es tan nueva.</p> <p>(4) Falta de madurez de las tecnologías, lo que conlleva altos costos operativos</p> <p>(5) Compra de equipos en el extranjero es complicado</p>
		<p>3. Necesidades y problemáticas en aspectos económicos.</p>	<p>(1) Pocos proveedores</p> <p>(1) Muy altos costos</p> <p>(2) La operación del centro es abordable para potenciar procesos de investigación y desarrollo.</p> <p>(2) Para poder realizar una expansión en la producción y/o poder trasladar las operaciones, podría volverse muy costoso.</p> <p>(2) Es necesario avanzar en instalaciones que tengan la flexibilidad de poder cambiar, ampliar o trasladarse en función de nuevos negocios</p> <p>(3) Realizar una planificación a largo plazo, es problemático. Debido a que no entregan financiamiento para mejoras incrementales.</p> <p>(4) Escasos mecanismos de financiamiento</p> <p>(5) Los proveedores son extranjeros y los impuestos resultan en una traba financiera para la compra de proyectos</p>
		<p>4. Necesidades y problemáticas en aspectos sociales.</p>	<p>(1) Los proyectos deben estar integrados con la ciudadanía con tal de hacerlos partícipes, fortaleciendo la mano de obra local y otorgando beneficios</p> <p>(2) Creemos necesario seguir informando a la comunidad universitaria y emprendedora para que conozcan este tipo de instalaciones con el fin de ampliar las posibilidades de nuevos negocios.</p> <p>(3) Las autoridades deben considerar a la planta de Hidrógeno verde para que puedan capacitar a la comunidad. Sobre todo, jóvenes escolares que puedan entender la cadena de valor del hidrogeno</p> <p>(4) Estos proyectos afectan directamente a las personas, sobre todo los megaproyectos</p> <p>(4) La involucración con comunidades favorecerá al desarrollo de la industria</p>
		<p>5. Necesidades y problemáticas en materias ambientales</p>	<p>(1) Muchos residuos de la cadena de valor no son parte de un plan de revalorización</p> <p>(1) Proyectos que no consideran la completitud de riesgos medioambientales que pueden generar</p> <p>(1) La responsabilidad ambiental por parte de las empresas se debe reforzar</p> <p>(2) No hemos tenido problemas en el ámbito ambiental, ni vemos una dificultad en la planta de hidrogeno para afectar el medio ambiente</p>

			(3) Como adaptar los trabajos a las condiciones ambientales extremas es el principal desafío. En verano se llegan hasta los 42°C y en invierno a 5°C.
			(4) Impacto de flora y fauna en zonas geográficas específicas

### 16.3.6 Matriz descriptiva a la categoría Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación (EPH2VDE)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EPH2VDE	Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación	1. Desarrollo de capacidades y tecnologías para exportación de hidrógeno verde y/o derivados	(1) Sí, proyecto ayuda a demostrar la factibilidad para la distribución de hidrógeno por medio de tuberías subterráneas en condiciones de mezcla.
			(2) Formación de nuevos instaladores de hidrógeno, instaladores clase 5 según la SEC.
			(2) Tener equipamiento exclusivo de hidrógeno, ayuda a entender las necesidades y problemáticas con respecto a la producción y uso.
			(2) Se estudian procesos térmicos, lo cual abre una serie de aplicaciones aún no estudiadas en el uso del hidrógeno. Por ejemplo, la regularización de artefactos de combustión que utilizan hidrógeno como combustible. Luego, podría ampliarse a uso de hornos, calderas y secadores.
			(2) La producción del hidrógeno debe ir de la mano con el uso, por lo tanto, es necesario que empresas puedan tener el conocimiento entero de la cadena de valor para asesorar a inversionistas que deseen utilizar hidrógeno
		2. Desafíos de infraestructura habilitante para exportación, según cadena de valor del hidrógeno verde y/o derivados	(3) Actualmente, nuestro centro no tiene expectativas de exportar hidrógeno verde. Creemos que hemos contribuido a generar capacidades al manejo y transporte del hidrógeno verde, generando protocolos de seguridad para el transporte de hidrógeno, mediante rack de 6 cilindros de 50[l] y el levantamiento y transporte.
			(3) Nuestro centro cuenta con un modelo de negocios para ofrecer a empresas extranjeras a utilizar nuestro hidrógeno verde y probar nuevas tecnologías.
			(4) No consideramos que este proyecto en particular considere un aporte directo al desarrollo de la exportación del hidrógeno verde o derivados
			(4) Se requiere mayor madurez y desarrollo de las tecnologías y mejorar la eficiencia en producción de hidrógeno verde
			(1) El principal desafío es contar con una regulación y legislación actualizada para este tipo de actividades, especialmente para compresión y transporte de hidrógeno en cantidades industriales.
	(2) Actualmente, no existen empresas que puedan recibir el hidrógeno producido y puedan transformarlo en un compuesto capaz de transportarlo. Se necesita una empresa que sea experta en el transporte de hidrógeno según su uso, volumen y periodicidad.		
	(3) El desafío para la infraestructura es contar con vehículos para el transporte de hidrogeno, y capacitación del personal. Se debe tener conocimiento de las normas de seguridad, por		

			lo que debe ser riguroso con las credenciales de la persona que haga este trabajo.
			(4) Motivar a empresas de energía y consorcios para ver posibilidad de participación directa en la industria de hidrógeno verde
			(5) La producción y transporte tiene sus desafíos
			(5) La exportación misma es la mayor dificultad

### 16.3.7 Matriz descriptiva a la categoría Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación (EDEPH2V)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EDEPH2V	Matriz descriptiva a la categoría Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación (EPH2VDE)	1. NP Inversiones y coordinación múltiples actores involucrados	(1) Falta una demanda clara de hidrógeno verde, sin esta demanda el interés tanto del sector público, como del sector privado no será elevada.
			(2) Actualmente, hemos visto mucho apoyo gubernamental para el desarrollo de inversiones en hidrógeno verde, sin embargo, no hemos visto empresas internacionales buscando aplicaciones o proyectos nacionales en hidrógeno verde.
			(2) Consideramos que falta una vitrina mayor de proyectos locales a interesados internacionales. Donde puedan conocer proyectos, personal calificado y empresas que tiene una trayectoria en hidrógeno verde.
			(3) Una de las problemáticas es disponibilidad de insumos y personal calificado en las alianzas públicos-privadas realizadas.
			(3) La coordinación debe hacerla un centro de investigación o pilotaje, debido a la experiencia e identificación de los desafíos técnicos y económicos. Tal fue el caso de CNP cuando coordinó con Colbún y CORFO.
			(4) No requieren mecanismos de financiamiento
		2. NP para adquisición de infraestructura y equipamiento producción hidrógeno verde a gran escala	(1) Hacen falta proveedores locales, que permitan reducir los costos de adquisición y fortalecer la industria local.
			(1) Tener mayor intercambio comercial y tecnológico con industrias de otros países.
			(2) La adquisición y disponibilidad de equipamiento de hidrógeno verde, es lenta y costosa. Sin duda, existe mucho espacio para la optimización de dicho campo.
			(4) El proyecto no considera producción de hidrógeno a gran escala
		3. NP ante funcionamiento del equipamiento	(1) La principal dificultad para este proyecto fueron las distancias de seguridad de la planta productora con respecto a las plantas satélites de regasificación (PSR)
			(2) La puesta en marcha de equipamiento dependerá mucho de las circunstancias. Consideramos importante que las empresas instaladoras y que realicen estos trabajos de puesta en marcha, tengan garantías y puedan tener espacio de aprendizaje, en el caso de retrasos.
			(2) Puede ser novedoso apoyar con garantías de fiel cumplimiento o correcta ejecución de obra por parte del estado, en caso de que los proyectos tengan demoras. Con el fin de apoyar a las empresas vanguardistas a realizar proyectos de gran envergadura.

			(3) La necesidad más importante fue la carencia de Hidrógeno verde para realizar pruebas. Hemos tenido que trasladar y vender hidrógeno verde para cumplir con la operación de buses a hidrógeno.
		4. NP ante incompatibilidades de infraestructura existente con respecto a equipamientos adquiridos	(1) La planta fue diseñada a la medida en términos de la infraestructura asociada al blending con hidrógeno, por lo que no se consideró infraestructura existente más allá del uso de suelo.
			(1) Se construyeron losas de hormigón armado de gran tamaño para asegurar una operación segura de la planta y caso de sismo o alguna otra condición adversa.
			(2) Actualmente, no hemos conocido incompatibilidades entre infraestructura existente y equipamiento adquiridos.
			(2) Proveedores Chinos no tienen una documentación clara y específica de su equipamiento de hidrógeno, lo cual puede ser complicado para adquirirlos y diseñar una planta.
			(3) La instalación de los equipos y la adaptación de las líneas de hidrogeno a los ambientes mineros es una problemática.
			(3) Se necesita capital humano capacitado para realizar las adaptaciones del equipamiento a la infraestructura existente.
			(4) Sistema eléctrico desactualizado, proceso de mantenimiento específicos para equipos e infraestructura y mediciones

### 16.3.8 Matriz descriptiva a la categoría Formación Técnica Profesional y Entrenamiento de Personal (EFTPEP)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
EFTPEP	Formación Técnica- Profesional y Entrenamiento de Personal	1. NP para asesorías y/o formación especializada en hidrógeno verde	(1) Todo partió con hidrógeno gris y la vinculación entre academia y empresa, generando las primeras investigaciones para poder llevar a cabo este proyecto que actualmente está operando en la Región (Valparaíso)
			(2) Actualmente, hemos visto una oferta de algunas empresas que entregan capacitaciones muy básicas en términos de instalaciones de hidrógeno.
			(2) Las capacitaciones son normalmente por académicos con estudios científicos y no industriales en materia de hidrógeno.
			(3) Actualmente la rotación del personal en CNP, ha dificultado generar personal con alta experiencia en el hidrogeno. Lo cual, no ha podido establecer procedimientos de capacitación y/o entrenamientos oficiales en la instalación, mantención y puesta en marcha de equipamiento de hidrógeno verde.
			(4) No ha habido problemas con el acceso a capacitaciones
		(5) Hay pocas capacidades en términos de normativas.	
		2. Formación especializada relevante	(1) Hay que poder abarcar toda la cadena de valor, desde los perfiles más básicos de la construcción de losas, enfierradura, etc. Hasta los perfiles más estratégicos de gestión y administración de proyectos que permitan establecer lazos fuertes entre las empresas, academia y estado, por ejemplo.
			(1) Fortalecer la cadena de valor del hidrógeno en términos de recurso humano
			(2) La capacitación más relevante es instalaciones y operaciones de forma segura en el ámbito del hidrógeno.

			(3) Las capacitaciones en mantención y operación son relevantes para poder prolongar el centro en el tiempo.
			(3) La dependencia de proveedores externos ha hecho difícil, la correcta viabilidad de la planta.
			(3) La capacitación en términos de la adaptación de los equipos a los ambientes mineros es fundamental, además de establecer un correcto panel de control ayudaría a estandarizar el monitoreo de la planta.
			(4) Toyota aún no ha formado un equipo definitivo en materia de H <sub>2</sub> .
			(4) Los principales perfiles requeridos son los más técnicos, y para proyectos grandes es muy importante contar con profesionales involucrados con las legislaciones para acelerar los procesos de los permisos en los proyectos.
			(5) La capacitación más importante tiene que ver con la seguridad, es la principal. Como manejar las emergencias e incidentes

### 16.3.9 Matriz descriptiva a la categoría Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con Hidrógeno Verde (EGIH2V)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave entrevistados
El hidrógeno verde	Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con Hidrógeno Verde	1. NP para redes, coordinaciones y gestiones	(1) No presenta problemáticas en términos de vinculación.
			(1) La comunicación entre las empresas, SEREMI, municipio, universidad, SEC, etc. Siempre ha sido directa y bajo los protocolos correspondientes
			(2) El financiamiento de instituciones de formación para personal calificado en hidrógeno es lo que consideramos más relevante, la cual debería ser una alianza público-privada. Es decir, que las instituciones de formación puedan entregar ofertas y preparación al campo industrial tan pronto como sea posible.
			(2) Necesario el vínculo entre empresas nacionales e internacionales, por lo que invitaciones y apoyo de empresas nacionales asistan a ferias del hidrógeno de distinta índole es necesaria que sea abordadas por organismos gubernamentales. Es necesaria dicha interacción
			(3) Existe acuerdos de cooperación con SERNAGEOMIN y la SEC para levantar procedimientos de uso del hidrógeno en Minería.
			(3) Esperamos poder seguir avanzando con nuevas conexiones para establecer estándares en cada tipo de industria según las necesidades del mercado.
			(3) Una perspectiva de mejora, tener financiamiento para poder ir revisando los distintos estándares de inspección y calidad de las industrias, con el fin de darle continuidad y seguimiento a dichos estándares.
			(4) Participar en eventos ayuda a dar a conocer los proyectos lo cual puede promover la generación de iniciativas y actividades demostrativas como el caso del Toyota Mirai

Nº	Categorías	Codificación	Subcategoría
1	Fuentes de energías renovables (ER)	EFER	1. Costos ER
			2. Logística de ER
			3. Desafíos de Producción de ER
2	Infraestructura para hidrógeno verde (carbono neutral)	EIH2V	4. Necesidades y problemáticas de infraestructura
3	Hidrógeno verde y su potencial carbono neutral	EH2VPCN	5. Economía carbono neutral
4	Proyectos de sostenibilidad de los Centros	EPSC	6. Necesidades y problemáticas de personal calificado.
			7. Necesidades y problemáticas técnicas (I+D+i).
			8. Necesidades y problemáticas económicas.
			9. Necesidades y problemáticas sociales.
			10. Necesidades y problemáticas ambientales
5	Producción hidrógeno verde y derivados para la Exportación	EPH2VDE	11. Desarrollo de capacidades y tecnologías para exportación
			12. Desafíos de infraestructura habilitante para exportación
6	Desafíos de Escalabilidad de Proyectos de hidrógeno verde (necesidades y problemáticas NP)	EDEPH2V	13. NP Inversiones y coordinación múltiples actores involucrados
			14. NP adquisición d infraestructura y equipamiento producción de hidrógeno verde a gran escala
			15. NP ante funcionamiento del equipamiento
			16. NP incompatibilidades infraestructura con respecto a equipamientos adquiridos
7	Formación Técnica- Profesional y Entrenamiento de Personal	EFTPEP	17. NP para asesorías y/o formación especializada en hidrógeno verde
			18. Formación especializada relevante
8	Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con hidrógeno verde	EGIH2V	19. NP para redes, coordinaciones y gestiones

### 16.3.10 Matriz descriptiva a la categoría Fuentes de Energías Renovables

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EFER	Fuentes de energías renovables (ER)	1. Costos de ER	<b>España:</b>
			(1) En Europa y España, donde conozco. Mucha disponibilidad de fuentes renovables, hay muchos proyectos fotovoltaicos para aplicaciones de todo tipo. Principalmente para el procesamiento de datos.  No hay mucho aplicados al hidrogeno. El hidrogeno aún no es rentable, hay muchos proyectos piloto. Pero, no son proyectos grandes. Solo proyectos en las fases iniciales. No percibo tanto desarrollo.
			<b>EE.UU.:</b>
			(2) La idea es diseñar un sistema que 'converse' con la red: si el costo es bajo, lo prendes, si es alto, lo apagas. Así, solo usas la energía barata de la red, y eso hace que sea mucho más rentable. Por ejemplo, si la red te da energía gratis de 1 a 5 de la mañana, la usas a concho para producir hidrógeno, en vez de competir por ella a las 2 de la tarde cuando todo el mundo la necesita. Tu sistema simplemente pararía en esos momentos caros. Económicamente, eso es mucho más beneficioso
			(4) El uso de electricidad renovable desde el punto de vista de los costes es económicamente viable. Los paneles solares están ampliamente disponibles en el sur de California y dentro de la región del sur de California se ha expandido enormemente. Eso ha reducido el costo de disponibilidad de la generación solar. Así que supongo que la respuesta que tendría con respecto a la electricidad es que sus paneles solares están ampliamente disponibles en el sur de California, y eso es lo que está ayudando a reducir la electricidad no renovable aquí en el estado.
		<b>Australia:</b>	
		(5) El precio de la electricidad será probablemente cero o incluso negativo a mediodía. Pero no tenemos la misma oportunidad por la tarde, cuando oscurece. Así que tenemos que almacenarla. Utilizarla en otros momentos.	
		2. Logística de ER	<b>España:</b>
			N/A
			<b>EE.UU.:</b>
(2) El principal desafío de la energía renovable es su intermitencia inherente. El sol no siempre brilla y el viento no siempre sopla. En el pasado, la discusión a menudo giraba en torno a la necesidad de gran capacidad de almacenamiento para la energía renovable			
(3) Nuestro sitio actual está conectado a la red [Texas], con paneles solares también conectados al sistema. Para nuestro programa de investigación, simulamos operaciones como si solo funcionaran con energía solar o eólica renovable de una granja en el oeste de Texas. Utilizamos algoritmos de control para hacer coincidir el funcionamiento del electrolizador con la disponibilidad de energías renovables y las condiciones del mercado. En una configuración, los paneles solares alimentan una sala de servidores específica a través de un sistema de distribución de DC. El exceso de energía solar produce hidrógeno, que luego se utiliza en una pila de combustible para gestionar los picos de carga. Esta configuración mejora la eficiencia energética y equilibra las demandas de energía. También simulamos un escenario detrás del contador en el parque eólico, utilizando mercados de electricidad en tiempo real para decidir cuándo producir hidrógeno. En última instancia, aunque todavía estamos conectados a la red, la			

			<p>investigación está diseñada para actuar como si estuviera alimentada exclusivamente por energías renovables</p>
			<p><b>Australia:</b></p>
			<p>(5) El gran reto actual es el almacenamiento en Australia. Y sospecho que también en otros lugares. La penetración de las energías renovables en la red es muy alta.</p> <p>(5) En general, con la combinación adecuada de energía eólica, solar, hidráulica y baterías, deberíamos ser capaces de conseguir la mayor parte de la electricidad en términos de fiabilidad.</p>
		3. Desafíos de Producción de ERNC	<p><b>España:</b></p>
			<p>(1) El primer desafío es que sea rentable. Creo que debería categorizarse la producción de energía verde, mediante alguna etiqueta verde.</p>
			<p>(1) La electrificación es el primer gran desafío. La gente se está revelando contra la mentalidad o un modelo ecológico verde, lo cual afecta la velocidad de la instauración de energías renovables.</p>
			<p><b>EE.UU.:</b></p>
			<p>(2) Una ventaja clave es que los electrolizadores pueden arrancar y detenerse de manera eficiente, sincronizándose bien con la disponibilidad de la fuente de energía renovable. Ese es el punto crucial. Por lo tanto, la energía renovable puede funcionar maravillosamente con los electrolizadores</p>
			<p>(3) Cuando se trata de hidrógeno, el principal desafío para las energías renovables es el aumento de las cargas que vamos a ver a través de los centros de datos y el uso de la IA y cosas de esa naturaleza. Nuestras cargas siguen creciendo. Ahora bien, nos preguntamos ¿Puede la energía renovable crecer lo suficientemente rápido como para respaldar eso? La transmisión, por supuesto, también se va a obstruir con el tiempo. Puede haber algunas opciones en las que los centros de datos se ubiquen más cerca de las fuentes renovables para aliviar parte de la congestión de la transmisión. Creo que el principal desafío es que nuestras cargas probablemente están creciendo más rápido de lo que podríamos desplegar las energías renovables que se necesitan para mantenernos al día.</p>
			<p>(4) Creo que va a ser más en el lado regulatorio, es decir, el lado gubernamental para tratar de adoptar las nuevas políticas y regulaciones del hidrógeno. El desafío va a estar más en la adopción de políticas regulatorias y regulatorias para la infraestructura de hidrógeno.</p>
			<p><b>Australia</b></p>
		<p>N/A</p>	

### 16.3.11 Matriz descriptiva a la categoría Infraestructura para Hidrógeno Verde (carbono neutral)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EIH2V	Infraestructura para el hidrógeno verde (carbono neutral)	4. Necesidades y problemáticas de infraestructura	<b>España:</b>
			N/A
			<b>EE.UU.:</b>
			(2) Un desafío crucial es la seguridad. Obviamente, se necesita un mejor conocimiento para prevenir problemas como la fragilización por hidrógeno, donde el hidrógeno puede degradar los materiales de tuberías e infraestructura.
			(3) Nos estamos alejando por completo de los combustibles fósiles, ese es el gran desafío. Tenemos que empezar por mejorar la conservación y la eficiencia. Tenemos que hacer todo eso, todo lo que podamos en todos los sectores. A veces incluso pienso en los movimientos de mercancías. Todo el mundo está tratando de hacer cero emisiones de los camiones de 18 ruedas. Al menos aquí en los EE. UU. enviamos tantas cosas con camiones de 18 ruedas y ¿por qué no usamos rieles? Lo que sería mucho más eficiente. Reduzca las emisiones rápidamente. Tenemos que empezar por cómo podemos hacer que todos nuestros sistemas sean más eficientes. Luego tenemos que electrificar. Ese es el siguiente paso. Todo lo que se pueda electrificar tiene que ser electrificado. Pero eso requiere energía baja en carbono en la red. Eso puede ser nuclear. Puede ser algún tipo de renovable. La geotermia también podría tener un papel en este sentido. Pero la descarbonización es un gran desafío.
			<b>Australia:</b>
(5) Para conseguir ese nivel de energías renovables se necesitará terreno para paneles solares, turbinas eólicas y otras infraestructuras. Así que hay un poco de resistencia al desarrollo descontrolado de la industria, sobre todo en las zonas agrícolas.			
			(5) La segunda cuestión no tiene tanto que ver con el hidrógeno, sino con el terreno que se ocupará con la energía eólica y solar, e incluso con las fuentes de agua que alimentarán la industria del hidrógeno verde.

### 16.3.12 Matriz descriptiva a la categoría Hidrógeno Verde y su potencial carbono neutral

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EH2VPCN	Hidrógeno verde y su potencial carbono neutral	5. Economía carbono neutral	<b>España:</b>
			(1) Los costos es el principal desafío. Conseguir una economía de cero emisiones. Sobre todo, en España el modelo de bienestar es muy caro. El aspecto geopolítico es relevante al momento de evaluar una economía 100% descarbonizada.
			(1) En China e India, hemos tenido negocios y oficinas comerciales, sin embargo, "Hay mucho ruido, pero pocas nueces". Dan algunos pasos, pero el 1% de la matriz energética sigue siendo todo carbón. Hay muchos proyectos, pero no se están ejecutando.

			<p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) No creo que logremos nunca una independencia total del carbono. Los combustibles fósiles han sido parte esencial por más de un siglo, y no pienso que la humanidad vaya a eliminar completamente los recursos basados en carbono. Sin embargo, es claro que la sociedad avanza hacia un futuro con menos carbono, aunque esta transición presenta desafíos económicos importantes.</p> <p>(2) Los desafíos son multifacéticos, abarcando aspectos sociales, económicos y técnicos. Pero el hidrógeno llegó para quedarse, y confío en que el mundo avanza hacia que el hidrógeno se convierta en una fuente de energía dominante. La velocidad a la que esto ocurrirá es menos segura, pero la dirección es clara</p> <p>(3) La selección y la planificación del sitio son tan importantes. En última instancia, debemos abordar estas preocupaciones con ciencia y transparencia. Eso es lo que tratamos de hacer con nuestro alcance educativo. Cuando ingresamos a una nueva comunidad, nos aseguramos de que entiendan lo que se está instalando y por qué, cubriendo la seguridad, el impacto ambiental y el uso del agua. La confianza se construye compartiendo información, no escondiéndose de las preguntas difíciles.</p> <p>(4) Para llegar a ese 100%, tienes que diversificar tu tecnología. No se puede hacer 100% de electricidad. Ya sabes, vas a tener que diversificar tu tecnología para tratar de cumplir ese objetivo. Entonces, esa sería mi respuesta. Mi respuesta es que la diversificación de las tecnologías renovables va a ser, creo, la clave para tratar de lograr el 100% de descarbonización.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>(5) El reto que tenemos es que no es tenemos una transición energética porque tenemos una gran industria del carbón</p>
--	--	--	--

### 16.3.13 Matriz descriptiva a la categoría Proyectos e Sostenibilidad de los Centros

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EPSC	Proyectos de sostenibilidad de los Centros	6. Necesidades y problemáticas en materia de personal calificado.	<p><b>España:</b></p> <p>(1) Es un tema crítico para nuestra empresa. Es el tema principal, quizás catastrófico. Las políticas migratorias, no ayudan. Los jóvenes que entran a trabajar es un desastre, muy poco preparados, poca actitud de trabajar. Tenemos muchos problemas para contratar personal calificado. En el largo plazo, no vemos políticas que ayuden a mejorar esta situación.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) Normalmente, trabajar con hidrógeno, particularmente en la producción o la gestión de infraestructura relacionada, requiere conocimiento y experiencia extensa. Para los jóvenes que se inician en este campo, es crucial estudiar materias como física, química e ingeniería. Aunque uno no puede especializarse en todas ellas en la universidad, es importante elegir un camino que construya una base técnica sólida para su carrera. Más allá de una única especialización, los graduados necesitan un conjunto de habilidades versátiles; por ejemplo, si tu especialización es en negocios, adquirir conocimientos adicionales en química e ingeniería es altamente beneficioso. A diferencia del pasado, ya no es factible quedarse en una disciplina estrecha y depender únicamente de ese conocimiento inicial para toda una carrera.</p> <p>(3) Necesitamos técnicos con formación transversal, personas que entiendan tanto los sistemas eléctricos de alta tensión como los sistemas de gas de alta presión.</p>

		<p>Estas habilidades a menudo se dividen entre oficios, pero los sistemas de hidrógeno exigen conocimientos integrados. Se trata de un vacío formativo e institucional. También necesitamos capacitar a los reguladores y a los socorristas, como también a las comunidades que no están familiarizadas con el hidrógeno. Educarlos es esencial para un despliegue seguro y para la confianza pública. Estamos trabajando en programas de capacitación para llenar este vacío.</p> <p>(4) Tener un equipo de ingeniería calificado. Con conocimientos básicos del hidrógeno, desde el nivel de una molécula hasta un proceso, es decir, con conocimientos de cómo se procesa el hidrógeno hasta los diferentes aspectos en la industria y el medio ambiente para convertirlo en algo más parecido a una microrred residencial o comercial.</p> <p>Con respecto a la capacitación básica o la experiencia que necesitaría a nivel de personal es tener esa experiencia en química de procesos.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>(5) Tenemos muchos ingenieros y científicos, ingenieros químicos y químicos electricistas, tenemos mano de obra. No es que haya gente saliendo de una industria buscando trabajo en otra. Ya están plenamente empleados en cosas como el carbón y el gas natural licuado. En realidad, se trata de identificar y atraer también a la mano de obra a la región para que esos proyectos no se frenen por falta de capacidad o de mano de obra</p>	
	<p>7. Necesidades y problemáticas en aspectos técnicos (I+D+i).</p>	<p><b>España:</b></p> <p>(1) Es difícil el manejo de recursos humanos principalmente. En Europa en general, los jóvenes no tienen una buena actitud a trabajar. Adicionalmente, no vemos buena la preparación de los jóvenes en los oficios clásicos: Gasfitería, electricidad y construcción. Hemos tenido muy mala experiencia.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) En cuanto a los aspectos técnicos, la estabilidad y la vida útil de las tecnologías son cruciales. Los investigadores en laboratorios y universidades deben colaborar activamente con la industria para comprender sus necesidades reales. He observado que mucha investigación publicada, aunque científicamente sólida, no siempre es práctica o directamente útil para la aplicación industrial. Por ejemplo, se ha publicado investigación utilizando 'eco-espuma' (o un enfoque similar) como base o medio. Sin embargo, al trabajar con la industria, se encontró que esta 'eco-espuma' no era adecuada porque no ayudaba a reducir los costos ni el volumen según se necesitaba.</p> <p>(3) Algunos enfoques prometedores están surgiendo de la investigación en etapa inicial, como la electrólisis fotoquímica impulsada directamente por la luz solar. Pero esos recién están saliendo del laboratorio. Hasta que estemos dispuestos a pagar más por el hidrógeno limpio, o hasta que la tecnología madure más, va a ser una cuesta arriba.</p> <p>(4) Un "su nuevo problema", el hidrógeno es nuevo en la industria. Por lo tanto, los desafíos más técnicos están tratando de adherirse a los estándares del hidrógeno. Un aspecto clave, que podría ser un desafío técnico es que no hay muchos estándares de hidrógeno que puedan adaptarse a diferentes tipos de aplicaciones.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>(5) La mayor parte de la información no es nueva. Simplemente procede de un sector diferente, como el de las instalaciones de gas, la ingeniería hidráulica o la ingeniería eléctrica. Pero si soy ingeniero eléctrico, puede que necesite aprender a trabajar con gases, por ejemplo. ¿Cuáles son las normas de seguridad? ¿Cómo funciona la química? No es un programa de cuatro años. Puede ser un programa</p>	

			de medio año o de diez semanas, o incluso de un fin de semana, para poder, dependiendo de lo mucho que necesiten profundizar, trabajar en ese sector.
	8. Necesidades y problemáticas en aspectos económicos.	<b>España:</b>	(1) El problema a futuro pueda ser que Europa no pueda abordar los rangos de salarios para el personal calificado.
		<b>EE.UU.:</b>	(2) Un desafío importante es el económico, ya que los métodos actuales de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (a menudo denominados hidrógeno gris o azul) siguen siendo significativamente más baratos que el hidrógeno verde producido mediante electrólisis
			(2) Desde un punto de vista económico, la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis necesita volverse competitiva con el hidrógeno actual basado en combustibles fósiles (gris/azul). Para ser competitivo, creo que el costo debe estar cerca, si no por debajo, de \$USD2 por kilogramo. Si cualquier proceso puede alcanzar un costo alrededor de \$USD2 por kilogramo de hidrógeno, entonces habrá un caso de negocio viable. Actualmente, el costo está alrededor de \$USD 7 u \$USD 8 por kilogramo.
			(3) En los EE. UU., el motor económico más importante en este momento es el crédito fiscal para la producción de hidrógeno. Es lo que va a permitir o no proyectos de hidrógeno verde a corto plazo. También hay financiación de centros de hidrógeno, pero se trata de casos aislados, no es recurrente. Necesitamos apoyo sostenido, no solo inyecciones iniciales de capital. En Texas, la economía es particularmente difícil. Tenemos electricidad y gas de bajo costo, lo que dificulta que el hidrógeno verde compita a nivel nacional. No hay ningún incentivo para cambiar si la energía convencional es barata y está disponible.
			(3) Nuestro mayor obstáculo, honestamente, fue el costo. Empezamos nuestro proyecto en 2020, pero todo estaba presupuestado en dólares de 2019. Luego llegó el COVID, y para cuando estábamos pagando el equipo y la construcción en 2022, los costos se habían disparado. Por lo tanto, estábamos constantemente tratando de ponernos al día con los déficits presupuestarios. Entonces, el dinero era el número uno, pero ese es el problema de todos.
			(4) Creo que todo se reducirá a la escalabilidad del hidrógeno. Entonces, la clave es que cuanto más grandes sean las plantas de producción de hidrógeno que podamos construir, el costo del hidrógeno se reducirá significativamente o será factible. Ese es el costo nivelado del hidrógeno es a lo que estoy tratando de llegar. Entonces, eso se reduce a la escalabilidad de sus plantas de hidrógeno.
			<b>Australia:</b>
	9. Necesidades y problemáticas en aspectos sociales.	<b>España:</b>	(1) Muchos problemas para la adaptación de distintas culturas en Europa. No existe una cultura con respecto a los Musulmanes, por ejemplo.
		<b>EE.UU.:</b>	(2) el obstáculo mental. La gente necesita superar la percepción del hidrógeno como algo asociado a 'víctimas' o peligro extremo, sacándolo de su esfera de miedo. Realmente necesitan adoptar una mentalidad abierta para abrazar esta nueva tecnología.

		<p>(2) En la mente del público, existe una impresión preexistente generalizada de que el hidrógeno es altamente peligroso</p> <p>(3) En lo que respecta a la opinión pública, no veo una resistencia generalizada al hidrógeno, más que una falta general de comprensión. La mayoría de la gente ni siquiera sabe que el hidrógeno es un gas peligroso. Simplemente no tienen el conocimiento básico. Por lo tanto, la educación es fundamental. Uno de nuestros objetivos en el centro es desarrollar programas de educación y divulgación. Llevamos a cabo un curso general de Hidrógeno 101 casi todos los semestres, con un fuerte enfoque en la seguridad. También estamos tratando de preparar a los socorristas, especialmente en las ciudades más pequeñas, para que sepan qué esperar de los sistemas de hidrógeno. Hemos visto demasiados ejemplos en los que las preocupaciones de seguridad se exageran porque la gente no entiende la tecnología.</p> <p>(3) Luego está el lado político de las cosas. Tenemos que dejar de elegir a personas que no saben de lo que están hablando. Ejemplo, los legisladores que cuestionan el por qué deberíamos incentivar los vehículos. Sencillamente, necesitamos un liderazgo que comprenda la urgencia y esté dispuesto a respaldar la transición con políticas reales.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>(5) A las comunidades les preocupa que algunas tierras de cultivo de gran valor estén siendo ocupadas por granjas solares. Y la realidad es que un parque solar situado junto a la agricultura puede ser de gran ayuda para obtener nuevas fuentes de ingresos para el agricultor</p>	<p><b>España:</b></p> <p>(1) Vemos cada vez un rechazo de las personas hacia temas ambientales.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) El aspecto ambiental a menudo está ligado a la política. Hay fuerzas políticas que están a favor del medio ambiente/la acción climática y otras que están en contra. Cuando prevalecen las opiniones a favor del clima, se impulsa la tecnología limpia. Cuando las opiniones opuestas son más fuertes, el foco permanece en los combustibles fósiles.</p> <p>(3) Ha habido cada vez más rechazos de las organizaciones ambientalistas sobre el uso del agua en la producción de hidrógeno. Esa se ha convertido en una de las críticas más citadas, especialmente aquí en Texas. Y sí, el hidrógeno necesita agua para la electrólisis, pero también lo hacen todas las grandes industrias. Si vamos a hablar del hidrógeno, tenemos que ser honestos sobre todo lo demás: la agricultura, el paisajismo, la refrigeración de las centrales eléctricas, los campos de golf. Hemos hecho modelos detallados para nuestra región. Incluso con un aumento significativo de la producción de hidrógeno, se prevé que la demanda de agua se mantenga por debajo del 10% del consumo total del Estado. Eso es con un aumento de diez veces en la producción de hidrógeno. No es insignificante, pero es manejable, especialmente si se tiene en cuenta que, en algunos casos de uso final, el hidrógeno podría reducir el uso de agua en general en comparación con los sistemas fósiles a los que está reemplazando.</p> <p>Además, está la circularidad del agua en el ciclo del hidrógeno. A escala global, el agua utilizada en la electrólisis no se pierde, sino que finalmente regresa al sistema. A nivel local, sin embargo, debemos tener cuidado. En regiones áridas o comunidades con estrés hídrico, cualquier demanda adicional podría ser sensible.</p> <p>También estamos trabajando para educar a los grupos ambientalistas. Algunos han comenzado a oponerse al hidrógeno, citando su uso de agua. Y sí, la electrólisis utiliza agua. Pero cuando se hacen los números, incluso si cumplimos con nuestros objetivos de hidrógeno para 2050 en Texas, el uso de agua seguiría siendo de un solo dígito como porcentaje del uso total del estado. La agricultura y los campos</p>
	<p>10. Necesidades y problemáticas en materias ambientales</p>		

			de golf utilizan mucho más. Si vas a señalar con el dedo, es mejor que mires a través del tablero.
			<b>Australia:</b>
			(5) Tenemos una región bastante industrial, así que las comunidades aceptan bastante el desarrollo industrial. Así que ese es un punto de partida

### 16.3.14 Matriz descriptiva a la categoría Producción Hidrógeno Verde, Derivados y Afines para la Exportación

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EPH2VDE	Producción de hidrógeno verde y derivados para la Exportación	11. Desarrollo de capacidades y tecnologías para exportación de hidrógeno verde y/o derivados	<p><b>España:</b></p> <p>(1) Si, totalmente. En el ámbito de la combustión hemos podido desarrollar una caldera de combustión con blending. Adicionalmente, hemos tenido experiencia en Europa, China e India. En estos últimos países es necesario tener presencia de una persona, porque es todo muy caótico.</p> <p>El desafío más importante es tener personal que pueda resolver temas técnicos.</p> <p>Vemos con buenos ojos la inversión que ha hecho Chile en materia de Hidrógeno, seguro tendrán retornos.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) Bueno, creo que el mayor desafío aquí es la política gubernamental. Cuando el gobierno está dispuesto a impulsar activamente la comercialización de una tecnología específica, el desarrollo tecnológico y la implementación se vuelven mucho más sencillos.</p> <p>(3) Texas aún podría convertirse en un importante exportador. Hemos realizado análisis de costos que muestran que el hidrógeno limpio producido en Texas puede ser competitivo a nivel internacional, especialmente en países como Alemania, donde los precios de la electricidad son más altos. Por lo tanto, si bien Texas podría no ser el primer adoptante, podría abastecer a otros.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>(5) Estamos en una región exportadora de energía, porque ya exportamos cosas como GNL e importamos amoníaco líquido. El puerto tiene muchas instalaciones para licuar y almacenar este tipo de productos. El hidrógeno es un poco diferente, pero existe la experiencia para poder hacerlo. Una de las claves de la infraestructura será la infraestructura compartida.</p> <p>(5) La gente se mueve hacia fuentes renovables, vamos a necesitar hidrógeno verde o vamos a necesitar derivados para poder ser un exportador de energía de baja emisiones, combustibles y productos químicos.</p> <p>Estamos trabajando con el puerto de Gladstone en una serie de proyectos para estudiar cosas como "puertos de energía verde", cuando llegan al puerto, potencialmente puedan conectarse a la red o se puede conectar a</p>

			una unidad móvil y no estar funcionando a diésel. Estamos trabajando para mejorar la densidad volumétrica del hidrógeno mediante un programa de investigación sobre el hidrógeno líquido. En estos momentos estamos iniciando ese programa para estudiar el hidrógeno líquido, que podría almacenarse más fácilmente. Hay problemas con las salpicaduras y la ebullición, pero se pueden solucionar. Se está trabajando en ello.
		12. Desafíos de infraestructura habilitante para exportación, según cadena de valor del hidrógeno verde y/o derivados	<b>España:</b>
			(1) Se debe avanzar en la estandarización de la forma en cómo se transporta el hidrogeno. Tener acuerdos globales entre países ayudaría a definir la infraestructura para el hidrogeno.
			<b>EE.UU.:</b>
			(2) En cuanto a la infraestructura actual, como he mencionado, no existe una infraestructura establecida específicamente para el transporte o almacenamiento de hidrógeno. Si bien se discute la mezcla de hidrógeno en gas natural, la mezcla máxima factible suele ser alrededor del 20%. Ese es el límite para ese enfoque. Debido a que el hidrógeno se maneja actualmente a pequeña escala, la infraestructura necesaria a gran escala simplemente no existe. Si el hidrógeno se va a convertir en un portador de energía significativo, suministrando potencialmente el 30%, 40% o incluso más de nuestras necesidades energéticas, entonces debemos desarrollar sistemas de transporte a gran escala.
			(3) Creo que el hidrógeno va a jugar un papel importante en eso, pero mover hidrógeno por todo el mundo no es fácil. Es difícil. Requiere mucha infraestructura. Requiere oleoductos y barcos y embarcaciones que puedan hacer esto. Tal vez sea un derivado o una forma diferente de ello. Tal vez dependamos de algunos combustibles de aviación sostenibles para algunos de los lugares más difíciles
		<b>Australia:</b>	
			(5) En la región hay una gran experiencia en licuefacción. En Gladstone también vamos a probar el almacenamiento subterráneo de hidrógeno. Uno de los problemas del hidrógeno es que, cerca del puerto, si se quiere mantener a alta presión en estado gaseoso en un gran depósito de almacenamiento, puede plantear problemas de seguridad a la población. Por ejemplo, el almacenamiento subterráneo de hidrógeno, que puede ser a baja presión, o el hidrógeno líquido, o el amoníaco líquido o el metanol. Su contribución sigue en marcha, pero muchos de nuestros socios industriales de la región están estudiando estos retos. La mejor manera de seguir exportando energía, pero con emisiones bajas o nulas.

### 16.3.15 Matriz descriptiva a la categoría Desafíos de Escalabilidad de Proyectos de Hidrógeno Verde (necesidades y problemáticas)

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EDEPH2V	Desafíos de Escalabilidad Proyectos de hidrógeno verde	13. NP Inversiones y coordinación múltiples actores involucrados	<p><b>España:</b></p> <p>(1) Hemos participado en consorcios de investigación. Nuestra empresa ha conseguido financiamiento mediante SGR (Sociedad Garantía Recíproca) son sociedades que te avalan, toman una participación, donde buscan entidades financieras. Por ejemplo, en nuestra empresa desarrollamos la automatización de procesos de soldadura, fueron 200.000 euros para el desarrollo. Normalmente,</p>

	(necesidades y problemáticas NP)		<p>buscamos ayudas económicas municipales, regionales y europeas, más amplio más dinero.</p>
			<p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) Esto se relaciona directamente con un punto que mencioné antes. Las alianzas público-privadas son extremadamente importantes, requiriendo tanto el apoyo de políticas gubernamentales como financiamiento privado. Por supuesto, el gobierno también tiene una influencia significativa. Como dije, cuando las prioridades políticas favorecen la acción climática, hay más apoyo para la investigación. Sin embargo, el apoyo puede fluctuar con los cambios políticos, llevando a mucha menos actividad cuando las prioridades cambian. Esta incertidumbre o discontinuidad puede ser un problema importante. Es perjudicial invertir en aprendizaje y desarrollo durante cuatro a ocho años solo para que el progreso se detenga por un período similar debido a cambios en las prioridades.</p> <p>(3) La asociación público-privada, comienza en lugares como nuestro centro de investigación. Lo que estamos haciendo con algunos de estos proveedores y sus equipos, sus primeros pilotos y demostraciones, es identificar, por ejemplo, cualquier pequeña pieza de equipo que pueda ser un punto débil dentro de su sistema, creo que es una necesidad y ayudará a acelerar la implementación de estas tecnologías. De todos modos, este tipo de asociaciones, utilizan fondos del gobierno para tratar de ayudar a respaldar y reducir el riesgo de la tecnología, creo que es importante. Así que, de todos modos, creo que se trata de reducir el riesgo para ese futuro despliegue comercial en el que el público no va a ser tan indulgente si se presenta en una estación y no funciona, que es exactamente lo que hemos visto en California.</p> <p>(4) Es clave es cuándo se va a construir infraestructura de hidrógeno. Que se asocie con una empresa, un contratista que tenga experiencia previa, que esté calificado en el manejo de equipos de hidrógeno durante la instalación y luego también en el aspecto de la puesta en marcha.</p>
		14. NP para adquisición de infraestructura y equipamiento producción de hidrógeno verde a gran escala	<p><b>Australia:</b></p> <p>(5) En ese caso, el gobierno tiene un papel que desempeñar: ser potencialmente el propietario de los activos y quizá tener un sistema de pago por el usuario. Ya lo hemos hecho en el pasado. Así fue como empezó nuestra industria del carbón en Queensland. De hecho, tuvimos una empresa privada de los EE.UU. llamada Utah Development Corporation. Que quería venir y extraer carbón. Esto fue hace 70 años, 60, 70 años en Queensland. Trajeron el capital.</p>
			<p><b>España:</b></p> <p>(1) Existen financiamientos a la inversión del hidrogeno verde, pero hay para todos los proyectos, no solo hidrógeno. ELKARGI es un ejemplo de soluciones financieras.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) Ahora mismo, la infraestructura central para la producción es el electrolizador mismo. Hay empresas que fabrican electrolizadores altamente fiables con capacidad para producción de hidrógeno a gran escala, lo cual es el primer paso antes de considerar el transporte y el almacenamiento. Obviamente, una producción significativa requiere una planificación inmediata para el transporte y el almacenamiento. Creo que la infraestructura de transporte y almacenamiento, aunque a mayor escala, más cara y requiriendo</p>

			<p>más capital, probablemente será más fácil de construir que superar los desafíos técnicos asociados con el lado de la producción en sí.</p> <p>(3) No podemos avanzar si no podemos mover el producto, especialmente las tuberías, los compresores, los tanques de almacenamiento y el equipo que envuelve los electrolizadores es un gran cuello de botella. Pero más allá del transporte, también hay un gran desafío con la madurez de los equipos. En este momento, dependemos de piezas listas para usar de otras industrias, válvulas, bombas, reguladores, que no necesariamente se diseñaron teniendo en cuenta el hidrógeno. Los proveedores todavía lo están descubriendo. Hemos tenido que cambiar el equipo porque simplemente no funcionaba en condiciones de hidrógeno. Existe la necesidad de componentes específicos para el hidrógeno, certificados por su seguridad y fiabilidad, con cadenas de suministro sólidas que los respalden. Y no se trata solo de hacer que funcione una vez, se trata de saber que funcionará cada vez. Ese tipo de repetitividad es en lo que la industria necesita tener confianza. Todavía no hemos llegado a ese punto. Todavía es pronto. Por eso son importantes los proyectos piloto como el nuestro. Pero para escalar, necesitaremos todo un ecosistema de proveedores de equipos que entiendan los requisitos y puedan entregar a gran volumen.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>(5) Una de las claves de la infraestructura será la infraestructura compartida.</p>
		<p>15. NP ante funcionamiento del equipamiento</p>	<p><b>España:</b></p> <p>(1) No existe mucho en ayuda para puestas en marchas. No hemos visto eso. En la medida que se pague el proyecto se financia la puesta en marcha.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) El mayor desafío, desde nuestra perspectiva (como investigadores), es encontrar una industria o empresa dispuesta a adoptar y utilizar nuestra tecnología. Por ejemplo, podríamos inventar un método patentado de tratamiento de agua necesario para la producción de hidrógeno. Lo que necesitamos es que una empresa 'recoja' esta tecnología y la implemente para la producción de hidrógeno. Idealmente, esta empresa ya estaría operando en el sector del hidrógeno verde y tendría los derechos o planes necesarios para la producción. Esto se relaciona con la dinámica necesaria de 'empuje y atracción' (push-pull) que mencioné anteriormente. Como investigadores, 'empujamos' el desarrollo tecnológico. Pero para que una empresa lo 'atraiga' (lo adopte), necesitan ver demanda en el mercado. Si no hay un cliente final dispuesto a comprar el producto final de hidrógeno producido utilizando nuestra tecnología, la empresa no la adoptará porque no puede monetizarla. Los investigadores necesitan usuarios finales (empresas), pero las empresas necesitan clientes para el producto final</p> <p>(3) Uno de nuestros obstáculos más subestimados fue la integración. Conseguir que todos los dispositivos, electrolizadores, pilas de combustible, inversores, sistemas de monitorización, se comuniquen de forma eficaz. No es plug-and-play. Cada sistema puede utilizar un protocolo de comunicación diferente, MODbus, CANbus, RS-232. Algunos pueden depender de Wi-Fi o Ethernet. Es un lío integrarlo a menos que tenga ingenieros que entiendan tanto el hardware como el backend digital. La ciberseguridad también es una preocupación. En este momento, operamos en un entorno controlado y fuera de línea. Pero a medida que los sistemas de hidrógeno se conectan a redes o herramientas de monitoreo remoto, crece el riesgo de</p>

		<p>ciberataques. Una computadora portátil podría derribar una instalación si no tenemos cuidado. Esto no es exclusivo del hidrógeno, es cierto para todos los sistemas industriales, pero es algo que debemos planificar desde el primer día.</p>	<p>(4) Los desafíos nacen de nuestro aprendizaje, de nuestra operación y mantenimiento. Esto es muy nuevo; Esto es nuevo para la compañía de cómo operamos y mantenemos una micro red de hidrógeno. Por lo tanto, se aprendieron muchas lecciones al tratar de optimizar la micro red para que funcione de manera eficiente. Mucho de eso se debe a la comprensión de cómo funciona el sistema de control de micro redes y cómo también se puede optimizar. Por lo tanto, hay muchos sistemas basados en software para optimizar la micro red. La unidad de control. Sí. Esa es la clave</p>
		<p>16. NP ante incompatibilidades de infraestructura existente con respecto a equipamientos adquiridos</p>	<p><b>Australia:</b></p> <p>Gran parte de ese trabajo se duplica en esta fase de la industria, porque aún no es competitiva. Así que es casi como si tuviéramos que trabajar antes de la línea de salida, antes de que haya una industria comercial, tenemos que trabajar juntos. Y una vez que exista una industria comercial, dependerá de cada empresa privada poder competir, innovar, reducir costes y crear mercados de forma individual, pero también colectiva. Así que se puede hacer más en colaboración. Y creo que gran parte de ello consistirá en darse cuenta de que se trata de un sector precomercial, que aún no es un mercado viable.</p>
			<p><b>España:</b></p> <p>(1) Se puede realizar cualquier tipo de remodelación y generar la compatibilidad de equipamiento en función de lo que se busque. En nuestro caso, la combustión es compatible la mezcla de hidrógeno con combustibles fósiles hasta un 20%. En caso de mayores% de mezcla, debemos avanzar en una nueva infraestructura de quemadores, sin embargo, hogares de combustión pueden ser todo igual.</p>
			<p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) Dado que todo (equipamiento, infraestructura) era nuevo, la integración fue un desafío.</p>
			<p>(3) Hemos tenido problemas de arranque que provienen de los lugares más mundanos, válvulas defectuosas, bombas de tamaño insuficiente, conectores que no coinciden. Nunca es el electrolizador el que se rompe primero; Son las pequeñas cosas que lo rodean. Rápidamente te das cuenta de que las cadenas de suministro industriales aún no están orientadas a los requisitos específicos del hidrógeno. Y los proveedores no siempre tienen datos claros sobre lo que funciona en estas condiciones. Esta es la razón por la que los primeros usuarios son tan importantes. Tenemos que resolver estas cosas en la fase piloto, no a escala. En California, las estaciones de vehículos de hidrógeno han sufrido estos mismos problemas, la gente aparece y no funciona. Eso ha dejado una mancha en todo el sector. Estamos tratando de evitar eso siendo el muñeco de prueba.</p>
			<p><b>Australia:</b></p> <p>(5) Lo que podríamos hacer es compartir muchas más instalaciones, ya sean atracaderos para combustibles líquidos, instalaciones de almacenamiento, oleoductos, incluso plantas desalinizadoras, incluso</p>

			<p>infraestructuras de transmisión eléctrica e incluso transporte marítimo.</p> <p>Eso reducirá los costes. También reducirá la huella y tal vez tenga una huella mucho más escalable, de modo que en lugar de tener 10 proponentes de proyectos haciendo cada uno lo suyo a la vez, puedan compartirlo y ampliarlo. Pueden empezar con uno. A medida que aumenten los volúmenes, quizá puedan añadir un segundo y estudiar cómo compartir los costes, los riesgos y los ingresos derivados de su utilización.</p>
--	--	--	--

## 16.3.16 Matriz descriptiva a la categoría Formación Técnica- Profesional y Entrenamiento de Personal

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EFTPEP	Formación Técnica- Profesional y Entrenamiento de Personal	17. NP para asesorías y/o formación especializada en hidrógeno verde	<b>España:</b>
			(1) Lo gestionamos internamente, las capacitaciones lo hacemos para técnicos e ingenieros son incluso con nuestro propio personal. Lo que hemos visto global, no hemos visto un plan para profesionales. Se hacen charlas y algunos cursos.  Al ser tan particular, no hemos visto mucha oferta. Precisamente, por la específica
			<b>EE.UU.:</b>
			(2) La capacitación para el equipamiento suele provenir de los proveedores específicos. Si bien se necesitan servicios de O&M (Operación y Mantenimiento) y educación especializada, desde mi perspectiva, al no estar directamente en el sector de servicios, creo que podría ser un poco prematuro centrarse intensamente en estos temas. Como mencioné antes, quizás deberíamos concentrar nuestros esfuerzos ahora en la tecnología de producción y en facilitar la adopción de productos de hidrógeno por parte de las empresas. Probablemente podamos abordar los temas relacionados con el servicio un poco más adelante.
			(3) Los aspectos de alta presión y los aspectos de alto voltaje, podrían ser dos técnicos diferentes o personas en la fuerza laboral. Creo que hay que tener en cuenta dentro de la industria que una persona puede hacer ambos trabajos. Hay una fuerza laboral y aplicaciones que operan bajo alta presión. Probablemente sea un obstáculo menor para superar, una gran cantidad de petróleo y gas está bajo una alta presión. Y algunas de estas aplicaciones de hidrógeno fueron a presiones bastante extremas, más de 700 bar en lugar de 70 bar, por ejemplo. Así que tal vez un poco más de cuidado allí, pero la alta presión no es necesariamente nueva en el mundo. Los sistemas de alto voltaje de DC son más nuevos. Realmente no hemos entrado en ese espacio hasta estos últimos 10 años más o menos. Y los vehículos eléctricos y las baterías, las baterías de iones de litio, realmente cambian ese juego. Probablemente haya lecciones que aprender de la industria del automóvil eléctrico y de las baterías sobre lo que han hecho para capacitar a la fuerza laboral en torno al alto voltaje y aplicarlo a los sistemas de hidrógeno cuando estamos hablando de baterías o electrolizadores y celdas de combustible. Pero incluso si ese currículo se ha desarrollado, tal vez tengamos un currículo de alta presión aquí. Si necesitamos esa habilidad en una sola persona, esa es, creo, la mayor necesidad. Y ni siquiera sé si es una necesidad. Tal vez los sindicatos y la forma en que funciona el mundo son, digamos, dos personas separadas. Pero en nuestra experiencia, cuando trabajamos en ello, ese ingeniero o técnico toca ambos sistemas en un momento dado. Muchos de nuestros proveedores vienen y trabajan en sus productos que nos ayudan a instalarlos y ponerlos en funcionamiento, envían a una persona o a cualquier persona que envíen que se sienta cómoda trabajando en ambas partes. No envían a dos personas, y una solo toca los cables y la otra toca la plomería. Los técnicos o ingenieros siempre están involucrados en ambos.
(4) Ahora mismo, en este sector, queremos adentrarnos en una formación diferente y en los servicios especializados en adversarios o servicios que se deberían prestar para trabajar en el sector del hidrógeno verde.			
<b>Australia:</b>			
(5) Por el momento, somos un centro universitario, pero quizá lo que necesitamos es ser un centro que pertenezca parcialmente a la universidad, pero que también tenga socios y miembros del gobierno y la industria, e incluso			

			<p>de otras universidades, para poder hacerlo. Creo que lo que mejor funciona en la colaboración es contar con una entidad independiente de cada uno de sus miembros, que se considere independiente y, por tanto, que inspire confianza y sea un lugar seguro para que los operadores comerciales que compiten entre sí trabajen juntos.</p>
		<p>18. Formación especializada relevante</p>	<p><b>España:</b></p> <p>(1) La preparación debe ser técnica y muy específica sobre cada parte de la cadena de valor.</p> <p><b>EE.UU.:</b></p> <p>(2) Una experiencia significativa en la construcción de microrredes, adquirida a lo largo de todas las fases del proyecto, sería muy relevante.</p> <p>(3) El programa de formación ideal produce técnicos que se sienten cómodos en ambos mundos. O al menos, alguien que sepa lo suficiente sobre el otro sistema para trabajar de manera segura y comunicarse claramente entre disciplinas. Eso es raro hoy en día. La mayoría de los programas educativos no ofrecen ese cruce.</p> <p>También necesitamos capacitación especializada para las autoridades que otorgan permisos, los inspectores de seguridad y los socorristas. Muchas de estas personas, especialmente en las ciudades más pequeñas, nunca habían visto una instalación de hidrógeno. No conocen los códigos, los riesgos ni los procedimientos de seguridad. Estamos tratando de abordar eso aquí con programas específicos de primeros auxilios y mediante el desarrollo de módulos de capacitación para los reguladores.</p> <p>(4) Recomendaría encarecidamente que la capacitación provenga de los proveedores especificados de equipos de hidrógeno. Ahí es donde vas a obtener la mayor parte de tu conocimiento de los proveedores reales que venden el producto. Esa es la forma en que hemos podido superar parte de la operación y el mantenimiento y tener un servicio de O&amp;M a corto plazo durante uno a tres años con los proveedores para ayudar a capacitar a su personal de O&amp;M. Entonces, lo que hice para este proyecto fue cuando compré el equipo, también compré el servicio de O&amp;M. Pero tuve ese apoyo de los vendedores. Y lo tuve durante dos años. Por lo tanto, mi equipo tiene dos años para comprender el O&amp;M y la capacitación que conlleva.</p> <p><b>Australia:</b></p> <p>Estamos ofreciendo una serie de cursos cortos, programas de media jornada, competencias que la gente puede elegir. Y, con el tiempo, acabará habiendo nuevas cualificaciones, supongo, para la gente del hidrógeno.</p> <p>Pero la mayor parte de la información no es nueva. Simplemente procede de un sector diferente, como el de las instalaciones de gas, la ingeniería hidráulica o la ingeniería eléctrica. Pero si soy ingeniero eléctrico, puede que tenga que aprender a trabajar con gases, por ejemplo. ¿Cuáles son las normas de seguridad? ¿Cómo funciona la química? No es un programa de cuatro años.</p>

### 16.3.17 Matriz descriptiva a la categoría Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con Hidrógeno Verde

Codificación	Categorías	Subcategoría	Consideraciones de los informantes clave según entrevistas
EGIH2V	Gobernanza e Institucionalidad relacionadas con Hidrógeno Verde	19. NP para redes, coordinaciones y gestiones	<b>España:</b>
			(1) No existe una regulación clara a nivel europeo. Nosotros abordamos los proyectos, utilizando la normativa del gas natural. Esperamos que las leyes sean incentiven la instalación rápida de hidrogeno.  Los proyectos europeos buscan la regulación por todo. Lo cual retrasa todo.  Normalmente, las normativas europeas son las que se siguen. Pero, hay países que imponen algunas legislaciones, lo cual hace que se relentezcan los proyectos.
			<b>EE.UU.:</b>
			Institución de Formación de Personal:
			(2) Como es evidente para cualquier sector o industria emergente, se requiere financiación sustancial inicialmente para llevar a cabo investigación, desarrollar tecnología y prepararla para su implementación. Posteriormente, se necesitan empresas para organizar la implementación de esta tecnología, poniéndola a funcionar para producir el producto final. Y, lo que es crucial, se necesitan clientes que compren ese producto. Por supuesto, como mencionó antes, el equipamiento y la tecnología requieren mantenimiento y servicio; el personal cualificado es esencial para ello.
			(2) Por lo tanto, necesita alianzas que involucren al gobierno, entidades públicas y empresas privadas. Requiere talento, recursos financieros, y también un grado de paciencia. Uno no puede esperar que todo cambie de la noche a la mañana. Incluso después de asegurar la financiación, capacitar al personal, desarrollar la tecnología y construir las habilidades necesarias, se necesita dar un poco más de tiempo para que todo encaje y funcione correctamente. No hay necesidad de apresurarse en cada paso
			(3) El Departamento de Energía estaba en un buen lugar con las políticas y la legislación de la administración anterior, el dinero adicional que se invirtió en el desarrollo de industrias y tecnología limpia, súper beneficiosa para todos los sectores, sin embargo, eliminar, deshacerse de la financiación de la investigación no va a ayudar. Eso perjudica a la universidad, pero ya sabes, perjudica a la sociedad en general porque muchas de estas cosas todavía necesitan avanzar. Pero sí, creo que es lamentable que estemos donde estamos ahora mismo con la política y el gobierno de Estados Unidos. Eso es lo más importante porque creo que hubo mucho impulso de la industria, de la sociedad.
(3) Tengo la esperanza de que podamos mantener algo de ese impulso. Estamos viendo algunos rumores de eso. Estamos viendo, hay algunos grupos que todavía están convencidos de ello. Muchos, hasta cierto punto, muchos de nuestros grandes centros de datos todavía están a bordo tratando de limpiar su uso de energía sin importar lo que suceda con la legislación. Pero sí, esa es, no sé, esa es mi respuesta hoy. Ojalá te hubieras hecho esta pregunta hace un tiempo. Podría haber hablado de muchas otras cosas, pero ese es realmente el mayor problema en este momento.			
(4) Debe provenir del más alto nivel de una agencia gubernamental para adoptar la tecnología del hidrógeno y proporcionar incentivos, programas y demás para ayudar realmente a fomentar esa infraestructura. Entonces, tal vez programas que puedan proporcionar. Todo debe venir del lado del gobierno.			

			<p><b>Australia:</b></p> <p>(5) Está el Grupo de Líderes Industriales de Gladstone. Está el Consejo Australiano del Hidrógeno. Está el Smart Energy Council, que tiene algo llamado Zero Carbon Hydrogen Australia, y una serie de empresas de colaboración. Supongo que el gran reto es que los operadores comerciales a menudo no quieren compartir la información, así es que trabajan por separado.</p> <p>(5) Es muy difícil que una empresa privada traiga a otra y le diga: vamos a trabajar juntos. Se trata de un largo proceso de adquisición, diligencia debida y <i>joint venture</i>. Pero si hay un tercero, como una universidad, una asociación industrial, una organización sin ánimo de lucro o un gobierno, que pueda ayudar a facilitar todas estas voces y todos estos proyectos, creo que ese es un buen enfoque.</p> <p>(5) Una de las cosas que espera nuestro centro es poder ser ese lugar en el que la gente pueda trabajar junta, pero sin comprometer su propiedad intelectual ni su información comercialmente sensible, sino poder afrontar retos que no pueden afrontar por sí solos o que pueden afrontar mucho más fácil y económicamente haciéndolo con otros.</p>
--	--	--	---

## 16.4 Matriz de investigación de fuentes bibliográficas y documental

ID	Nombre Documento	Autor/es	Autor Institucional (de corresponder)	Año Publicación	Escala
1	Políticas para el Hidrógeno Verde	International Renewable Energy Agency (IRENA)	International Renewable Energy Agency (IRENA)	2025	Internacional
2	Global trade in green hydrogen derivatives	International Renewable Energy Agency (IRENA)	International Renewable Energy Agency (IRENA)	2025	Internacional
3	El Hidrógeno Verde en Chile	Mariana Isasi	Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Santiago de Chile	2024	Internacional
4	Encuesta sobre Gasto y Personal en Investigación y Desarrollo en Empresas, Estado, Educación Superior e Instituciones Privadas sin Fines de Lucro, Año de Referencia 2022	Instituto Nacional de Estadísticas, Chile (INE)	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA)	2024	Nacional
5	Hidrógeno verde en Chile. Una oportunidad para Chile	Nicolás Silva y Juan Pablo Purcell	Invest Chile	2024	Nacional
6	Estudio H2 Chile. Capital Humano de la Industria del Hidrógeno Renovable: Desafíos Actuales y Futuros	Isabellaboese y Gerardo Figueroa	Asociación Chilena de Hidrógeno	2023	Nacional
7	Plan Nacional de Centros	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA)	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA)	2023	Nacional
8	Construyendo un Futuro Verde de Chile para el mundo	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Internacional
9	El Hidrógeno Verde y sus Derivados	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Internacional
10	Energía Femenina en el Mercado Emergente del Hidrógeno Verde	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Nacional
11	Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Nacional
12	Hidrógeno Verde: Un Horizonte Limpio. Visualizando el Futuro del Hidrógeno Verde en Chile	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Nacional
13	Una Nueva Identidad Productiva. Desarrollando la Industria del Hidrógeno Verde en Chile	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Nacional
14	¿Qué es el Hidrógeno Verde?	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2023	Nacional
15	Encadenamientos productivos de la industria del hidrógeno verde y derivados en Magallanes y la Antártica Chilena	Mauricio Ojeda	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH	2023	Internacional
16	Criterio de Evaluación en el SEIA: Descripción Integrada de Proyectos para la Generación de Hidrógeno Verde en el SEIA	Servicio de Evaluación Ambiental	Servicio de Evaluación Ambiental	2023	Nacional
17	Contexto Laboral Hidrógeno Verde	Worldwide Recruitment Energy (WRE)	Worldwide Recruitment Energy (WRE)	2023	Internacional
18	Global Hydrogen Review 2023	International Energy Agency (IEA)	International Energy Agency (IEA)	2023	Internacional
19	NFPA 2 Hydrogen Technologies Code	National Fire Protection Association	National Fire Protection Association	2023	Internacional

20	Una Propuesta de Crecimiento del Ecosistema de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación en Chile	Consejo Asesor Ministerial	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA)	2022	Nacional
21	Contexto Laboral y Previsiones de Crecimiento del Hidrógeno Verde	Worldwiderecruitmentenergy (WRE)	Worldwiderecruitmentenergy (WRE)	2022	Internacional
22	El Hidrógeno Verde en la Unión Europea: una Vía Necesaria para la Transición Energética	López Antoranz J.	Revista Española de Desarrollo y Cooperación	2021	Internacional
23	Estrategia de Desarrollo y Transferencia Tecnológica para el Cambio Climático	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA)	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MINCIENCIA)	2021	Internacional
24	Centro de Investigación y Desarrollo e Institutos Tecnológicos Públicos. Principales características y desafíos	Pedro Sierra Bosch	Consejo Nacional De Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación para el Desarrollo	2021	Nacional
25	Manual del Hidrógeno Verde	Javiera Ziehe, Karin Walter, Tatiana Oliva, Paola Cárdenas y Juan González	Alianza Estratégica Hidrógeno Verde para el Biobío y Universidad de Concepción	2021	Internacional
26	Cuantificación del Encadenamiento Industrial y Laboral para el Desarrollo del Hidrógeno en Chile	HINICIO Chile	Deutsche gesellschaftfürinternationalezusammenarbeit (GIZ) Gmb	2020	Nacional
27	Hidrógeno - Cadenas de Valor y Legislación Internacional	Fichtner y GIZ	Deutsche gesellschaftfürinternationalezusammenarbeit (GIZ) Gmb	2020	Internacional
28	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2020	Nacional
29	Estrategia Nacional Hidrógeno Verde	Ministerio de Energía	Ministerio de Energía	2020	Nacional
30	Utilización de la Capacidad Instalada: Medición y Aplicaciones	Fernando Mundaca, Miguel Saldarriaga y César Virreira	Revista Moneda	2019	Internacional
31	Manual de Frascati 2015. Guía para la Recopilación y Presentación de Información sobre la Investigación y el Desarrollo Experimental	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)	2018	Internacional
32	Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile	Rodrigo Vásquez y Felipe Salinas	Deutsche gesellschaftfürinternationalezusammenarbeit (GIZ) gmbh	2018	Nacional
33	What is a Prototype? What are the Roles of Prototypes in Companies?	Carlye A. Lauff, Daria Kotys-Schwartz, Mark E. Rentschler	Journal of mechanicaldesign	2018	Internacional
34	Testing Security Requirements with Non-experts: Approaches and empirical investigations	Bernhardpeischl, Michael Felderer y arminbeer	Bernhardpeischl, Michael Felderer y arminbeer	2016	Internacional
35	Utilización de la Capacidad Instalada en la Industria	Luciano Jara	Observatorio Económico Social de la U. Nacional de Rosario (UNR)	2015	Internacional
36	Fortalecimiento de cadenas de valor como instrumento de la política industrial. Metodología y experiencia de la CEPAL en Centroamérica	Nahuel Oddone, Ramón Padilla y Bruno Antunes	Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)	2014	Internacional
37	Técnicas para Investigar. Recursos Metodológicos para la Preparación de Proyectos de Investigación	José Yuni y Claudio Urbano	Editorial Brujas	2014	Internacional

38	Dimethylether: A review of technologies and production challenges	Zoha Azizi, Mohsen Rezaeimanesh, Tahere Tohidian, Mohammad Reza Rahimpour	School of Chemical and Petroleum Engineering, Department of Chemical Engineering, Shiraz. University Shiraz 71348, Iran	2014	Internacional
39	Manual de Oslo. Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)	2006	Internacional
40	Introduction to simulation	Ricki G. Ingalls y K. Preston White	Oklahoma state university y University of Virginia	2002	Internacional
41	A Handbook for Value Chain Research	R. Kaplinsky y M. Morris	Instituto de Estudios del Desarrollo, Universidad de Sussex, Brighton, Reino Unido	2001	Internacional
42	Expert Systems for Monitoring and Control	Daniel Dvorak	Department of computer science the university of Texas at Austin	1995	Internacional
43	Encyclopedia of Materials Characterization	Arun R. Srivatsa	Arun R. Srivatsa	1994	Internacional
44	Guidebook on Design, Construction and Operation of Pilot Plants for Uranium Ore Processing	International atomic energy Agency	International atomic energy Agency	1990	Internacional

## 16.5 Desafíos de infraestructura y equipamiento que enfrenta Chile para transitar a una economía 100% descarbonizada

En relación con los desafíos que enfrenta el país en materia de infraestructura y equipamiento para avanzar en la descarbonización de su economía, los resultados del estudio permiten identificar un conjunto de necesidades y problemáticas que deben ser abordadas de manera prioritaria. El análisis se ha estructurado en torno a tres criterios centrales, definidos considerando un horizonte de proyección hacia el año 2030. Estos criterios son los siguientes:

1. Infraestructura habilitante para el desarrollo del hidrógeno verde a nivel nacional.
2. Equipamiento especializado requerido para investigación, pilotaje, formación y operación de tecnologías asociadas al hidrógeno verde.
3. Condiciones técnicas y operativas necesarias para contribuir efectivamente a una economía carbono neutral.

Para el primero de estos, infraestructura para hidrógeno verde, los actores entrevistados se posicionan según las siguientes posturas:

- *“Para avanzar en la descarbonización hay que aumentar la demanda de energías más limpias, mejorar la infraestructura” (EIH2V-01-25)*
- *“Existe un alto costo para una instalación de planta de hidrógeno para su uso, en comparación a fuentes convencionales como el GLP. Estamos hablando de una diferencia de 25 a 1. El costo principal está en el electrolizador, tecnología que debe reducir su precio si es que quiere acercarse a una instalación de gas o petróleo” (EIH2V-02-25)*
- *“Necesario avanzar en estudios donde el hidrógeno sea competitivo y conocer quienes pagarán un mayor valor de un producto hecho por energía descarbonizada” (EIH2V-02-25)*
- *“En zonas remotas existen desafíos importantes, donde el hidrógeno podrá jugar un rol clave” (EIH2V-06-25)*

- *“Hay que reforzar y actualizar los planes estratégicos nacionales del hidrógeno verde y la generación eléctrica renovable” (EIH2V-04-25)*

En cuanto al equipamiento, se comunican las siguientes posturas:

- *“Chile, lamentablemente está alejado de la industria manufacturera de equipamiento del hidrógeno, lo cual genera graves problemas en la continuidad de la instalación de una planta, junto con la carencia de personal calificado” (EEH2V-02-25)*
- *“Hemos tenido problemas en conseguir empresas especializadas en la mantención de los equipos presentes en la planta de hidrogeno. Ejemplo, solo existe la empresa TRA, pero la mantención de los compresores, no hemos tenido la posibilidad de encontrar algún proveedor” (EEH2V-03-25)*
- *“Sin una red de contactos, se hace muy difícil avanzar en ampliar y mejorar el equipamiento de nuestro centro” (EEH2V-02-25)*
- *“En este momento, el equipamiento con uso más experimental que para aplicaciones comerciales y por tanto para descarbonizar el sector” (EEH2V-11-25)*

Finalmente, en cuanto a una economía carbono neutral, pensando en Chile 2030, se comunican las siguientes posturas:

- *“Hay muchos desafíos por delante, el plan nacional considera la descarbonización total en el año 2050, por lo que resulta importante hacer leyes que permitan la ejecución de proyectos que aceleren la descarbonización” (EH2VPCN-01-25)*
- *“Si Chile quiere ser carbono neutral al 2030, es clave potenciar la formación de capital humano avanzado en dicha materia” (EH2VPCN-02-25)*
- *“El hidrógeno debe ser considerado como un gas libre de impuesto, de tal manera de incentivar la generación y uso de este en la economía. Considero que debería utilizarse en todos los ámbitos posible para tener una economía del hidrogeno madura” (EH2VPCN-02-25)*
- *“La única forma en que veo que esto podría ocurrir es mediante un incentivo. Por ejemplo, en la industria minera, que el cobre producido con bajas emisiones se pueda vender un 50% más caro que el cobre con altas emisiones. Entonces, evidentemente, todos buscarán producir cobre con bajas emisiones (usando, por ejemplo, hidrógeno verde). Así, habrá una razón real para descarbonizar” (EH2VPCN-7-25)*
- *“Poco tiempo para lograr esa meta ya que son muchos los desafíos a lograr para llegar a una meta súper ambiciosa. Ejemplo puede ser a través de incentivos para la inversión, ya que el uso de carbono es más económico para la generación de energía, por lo que existe poca viabilidad económica de alternativas renovables por los altos costos de estas: el HV” (EH2VPCN-11-25).*

## 16.5.1 Instrumentos

### 16.5.1.1 Encuestas

#### 16.5.1.1.1 Encuesta para centros de I+D+i nacionales

[https://drive.google.com/file/d/1Mje3z\\_ut\\_tyknfssoqbixkjbrcryuyv38/view?Usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1Mje3z_ut_tyknfssoqbixkjbrcryuyv38/view?Usp=sharing)

#### 16.5.1.1.2 Encuesta para instituciones de formación de personal nacionales

[https://drive.google.com/file/d/1yzjn-il0xcee4dxdpyg\\_Ol4IqVCFrhv\\_L/view?Usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1yzjn-il0xcee4dxdpyg_Ol4IqVCFrhv_L/view?Usp=sharing)

#### 16.5.1.1.3 Encuesta para instituciones internacionales

<https://drive.google.com/file/d/18i8bvx5qvdpoa9a8cpikg6eeiu6bg4zj/view?Usp=sharing>

### 16.5.1.2 Entrevistas

#### 16.5.1.2.1 Entrevistas nacionales

[https://drive.google.com/file/d/1szzddwd0\\_f7uoloqsnmqpf-mms90-7\\_g/view?Usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1szzddwd0_f7uoloqsnmqpf-mms90-7_g/view?Usp=sharing)

### 16.5.1.3 Talleres

#### 16.5.1.3.1 Registro de talleres

[https://drive.google.com/drive/folders/1iSAEVnaOJb795kYzxA7x7x\\_RVoek\\_mV0?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1iSAEVnaOJb795kYzxA7x7x_RVoek_mV0?usp=sharing)