

Transporte y Movilidad con H_2 en la región LATAM para Red de aprendizaje RH2

Informe final

Global Gateway

Unión Europea

Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

aecid

Proyecto TeamEurope Desarrollo del Hidrógeno Renovable RH2

Edición:
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:
Team Europe Desarrollo del Hidrógeno Renovable en Chile (RH2)

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:
George Cristodorescu

En coordinación:
Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.energia.gob.cl

Registro de Propiedad Intelectual Inscripción: En trámite.
ISBN: 978-956-8066-81-9. Primera edición digital: septiembre 2025

Cita:

Título: Transporte y Movilidad con H2 en la región LATAM para Red de aprendizaje RH2
Autor(es): GIZ; ECIT: Josefa Ibaceta, Sebastián Álvarez, David Armijo, Gonzalo Garretón, Constanza Mendoza.
Revisión y modificación: Patricio Bastias Ortiz, Gustavo Leiva Gajardo
Edición: Josefa Ibaceta, Patricio Bastias Ortiz
Santiago de Chile, 2025.
92 Páginas
Hidrógeno – Electromovilidad – HRS - Baterías

Aclaración:

Esta publicación ha sido preparada por encargo del Proyecto “Team Europe para el Desarrollo del Hidrógeno Renovable en Chile”, el cual es cofinanciado por la Unión Europea y el Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima de Alemania (BMWK). La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH es una de las agencias implementadoras de la presente iniciativa y el Ministerio de Energía de Chile es la institución contraparte. Sin perjuicio de lo anterior, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile, GIZ, la Unión Europea o el BMWK. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile, GIZ, la Unión Europea o el BMWK.

Santiago de Chile, 30 de septiembre de 2025.

Resumen Ejecutivo

El presente estudio analiza el estado actual y las perspectivas de la electromovilidad con hidrógeno (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) en América Latina, con especial énfasis en seis países miembros de la RedH2R: Chile, Argentina, Uruguay, Colombia, México y Costa Rica. A nivel global, se observa que la tecnología de celdas de combustible continúa consolidándose en sectores de transporte pesado, urbano e industrial, con redes de estaciones de repostaje en expansión en Europa, Estados Unidos y China. En contraste, en América Latina los avances son aún incipientes: se identificaron 24 proyectos relevantes de movilidad con hidrógeno, la mayoría en fase piloto o de validación tecnológica, lo que refleja que la región se encuentra en una etapa temprana de desarrollo.

El análisis muestra que Chile y Argentina concentran el mayor potencial en proyectos vinculados a minería, transporte de carga y logística de larga distancia, aprovechando su capacidad de producción renovable y la necesidad de soluciones en zonas aisladas. Uruguay destaca por aplicaciones en el sector forestal, mientras que Colombia explora iniciativas en transporte público masivo como Transmilenio. México y Costa Rica presentan experiencias iniciales, pero aún carecen de proyectos a escala comercial. En general, se observa que la disponibilidad de hidrógeno es desigual entre países y que la zonificación (urbana vs. aislada) es determinante: en áreas metropolitanas se favorece el transporte público y corporativo, mientras que en regiones remotas surgen oportunidades de independencia energética mediante producción local de hidrógeno renovable.

Se desarrollaron simulaciones para evaluar la viabilidad económica de proyectos de FCEV en la RedH2R. En una primera etapa se analizó una ruta específica para estimar el desempeño anual de camiones FCEV y vehículos a batería (Battery Electric Vehicles, BEV); en una segunda, se simuló el transporte de un volumen fijo de material, comparando la flota y la infraestructura necesaria en cada tecnología; y en una tercera, se evaluaron los costos operacionales —combustible, peajes, seguros y salarios— en los seis países miembros, complementando el análisis con buses interurbanos para contrastar diferencias de inversión y operación.

El análisis comparativo de FCEV frente a BEV muestra que, en escenarios de transporte de carga mediante camiones, los FCEV presentan ventajas en autonomía, tiempos de recarga y volumen movilizado, aunque a costa de un mayor consumo de hidrógeno y mayor gasto en combustible, lo que impacta fuertemente en la viabilidad económica. En contraste, los BEV requieren más unidades y estaciones de carga para cumplir objetivos equivalentes, lo que eleva su CAPEX. Chile y Argentina concentran el mayor potencial en proyectos vinculados a minería y logística de larga distancia. Para el caso de buses, los BEV logran ser más competitivos por sus menores costos tecnológicos y porque la ventaja de autonomía de los FCEV pierde relevancia al existir tiempos de recarga posibles en paradas interurbanas. Las diferencias entre países se explican principalmente por el precio del hidrógeno, peajes y salarios de conductores, siendo Argentina, Chile, Uruguay y Colombia los mercados con mayor potencial. La simulación confirma que la subvención al hidrógeno es el único mecanismo capaz de asegurar viabilidad generalizada de proyectos, mientras que futuros estudios deberían ampliar el análisis hacia camiones especializados (como compactadores, cisternas, mixers o refrigerados) y considerar nuevas variables en buses, como diferenciación tarifaria, variaciones estacionales y modelos privados de transporte, para reflejar mejor los contextos operacionales reales.

En conclusión, la región avanza hacia la movilidad con hidrógeno de forma gradual, priorizando proyectos internos y corporativos antes de alcanzar esquemas de mayor escala y complejidad. La consolidación de este mercado dependerá de políticas públicas estables, esquemas de subsidio y financiamiento que mejoren la viabilidad económica, así como de la articulación entre actores privados, públicos y académicos.

Lista de siglas

AC Corriente alterna

BEV Vehículo eléctrico a batería

BMWK Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima de Alemania

CFE Comisión Federal de Electricidad

CGA Asociación de Gases Comprimidos (Compressed Gas Association)

CSA Asociación Canadiense de Normalización

DC Corriente continua

DS Decreto Supremo

EC Comisión Europea (European Commission)

EU Unión Europea

FCEV Vehículo eléctrico a celda de combustible

GEI Gases de efecto invernadero

H_2 Hidrógeno

HRS Estación de recarga de hidrógeno

IEA Agencia Internacional de Energía

IEC Comisión Electrotécnica Internacional

IRA Acto de reducción de la inflación (Estados Unidos)

ISO Organización Internacional de Normalización

LATAM América Latina

LCOH Costo nivelado del hidrógeno

NDC Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional

NFPA Asociación Nacional de Protección contra Incendios (Estados Unidos)

OIML Organización Internacional de Metrología Legal

PEMFC Celda de combustible con membrana de intercambio protónico

Red RH2 Red de Aprendizaje en Hidrógeno Renovable

RESS Sistema de almacenamiento de energía recargable

SAE Sociedad de Ingenieros Automotrices

UL Laboratorios Underwriters (organismo de certificación)

WP.29 Grupo de Trabajo de la ONU para la armonización técnica de vehículos (World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations)

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación de tecnologías para camiones- baterías e hidrógeno con respecto al diésel. 7
Tabla 2 Valores de carga y costos operativos relacionados al consumo 8
Tabla 3 Ejemplos de peligros, consecuencias y medidas de mitigación para HRS 15
Tabla 4 Distancia mínima de seguridad de sistemas de hidrógeno presentes en una HRS con respecto a diferentes grupos de exposición..... 16
Tabla 5 Análisis. Comparación de tecnologías de estaciones de respotaje: BEV y FCEV 17
Tabla 6 Normativa de seguridad para FCEV 18
Tabla 7 Principales tipos de regulación identificados para FCEV 19
Tabla 8 Normativa de seguridad para HRS 19
Tabla 9 Principales ejes normativos identificados para HRS 20
Tabla 10 Modelos de negocio para casos de electromovilidad con hidrógeno 24
Tabla 11 Instrumentos de política pública para incentivo del mercado del H_2 en países de la Red RH229
Tabla 12 Tipos de proyectos recomendados por país de la red según características de zonas urbanas y aisladas. Adaptado [122,123]..... 38
Tabla 13 Clasificación de proyectos de electromovilidad a hidrógeno en Latam según modelo de negocio. 44
Tabla 14 Modelos de camiones incorporados en la simulación, ordenados por autonomía (km)..... 52
Tabla 15 Modelos de buses incorporados en la simulación 52
Tabla 16 Costos de capital y operativos para camiones y buses FCEV y BEV 53
Tabla 17 Rutas consideradas en las simulaciones 54
Tabla 18 Variables consideradas en las herramientas de simulación 55
Tabla 19 Parámetros económicos asociados a los países de la Red RH2 55
Tabla 20 Datos de ruta Santiago - Temuco 60
Tabla 21 Parámetros generales y criterios de operación para camiones y buses FCEV y BEV 60
Tabla 22 Caracterización técnica de camiones de hidrógeno y batería utilizados en el Caso 1..... 61
Tabla 23 Resultados operacionales en el primer año del proyecto 61
Tabla 24 Desglose de costos para ambas tecnologías 62
Tabla 25 Resumen económico de tecnologías – Caso de camiones 63
Tabla 26 Parámetros técnicos FCEV y BEV..... 65
Tabla 27 Condiciones de ruta Bogotá - Tunja..... 66
Tabla 28 Resultados de simulación en el primer año del proyecto 66
Tabla 29 Desglose de costos de buses FCEV y BEV al primer año del proyecto..... 67
Tabla 30 Resumen de tecnologías – Caso de buses 67
Tabla 31: Comparativa de buses FCEV y BEV en ruta corta para los países de la Red. 70
Tabla 32: Comparativa de camiones FCEV y BEV en ruta larga para los países de la Red. 71
Tabla 33 Comparación de TCO de electromovilidad propulsada a H2 entre países de la RedH2R..... 72
Tabla 34 Componentes del OPEX para camiones FCEV..... 73
Tabla 35 Análisis de ventajas y desventajas por país de la Red RH2 para FCEV..... 78

Índice de Figuras

Figura 1 Venta de vehículos eléctricos en período 2016-2023 [3]..... 5
Figura 2 Esquema de recarga para cargadores AC y DC 10
Figura 3 Tiempo estimado de carga según potencia del cargador [28]..... 10
Figura 4 Tipos de cargadores disponibles para BEV [28]..... 11
Figura 5 Ejemplo de estación de recarga de hidrógeno y sus principales componentes [29]..... 12
Figura 6 Ejemplos de boquillas de 35 y 70 MPa de la marca alemana WEH [33] 13
Figura 7 Ejemplos de boquillas de 35 y 70 MPa de la marca suiza Stäubli [34] 13
Figura 8 Evolución de la cantidad de estudios de electromovilidad basada en hidrógeno con foco países Red RH2..... 27
Figura 9 Cantidad de proyectos de electromovilidad con H2 en países de la Red RH2 40
Figura 10 Evolución de la cantidad de proyectos de movilidad con hidrógeno en los países de la red RH2 43
Figura 11 Análisis cuantitativo de índices claves por parte de la consultora..... 46
Figura 12 Percepción Latam del crecimiento del mercado de H2 local..... 48
Figura 13 Tiempo en que demora un circuito (ida y vuelta)..... 63
Figura 14 Desglose del TCO para camión FCEV 64
Figura 15 Desglose del TCO para camión BEV..... 64
Figura 16 Comparación de VAN de proyectos de camiones FCEV y BEV 65
Figura 17 Desglose del TCO para bus FCEV 68
Figura 18 Desglose del TCO para bus FCEV 68
Figura 19 VAN de proyectos de buses FCEV y BEV..... 69
Figura 20 VAN-10 años para proyectos de camiones FCEV y BEV en países de la RedH2R 73
Figura 21 VAN-10 años para camiones FCEV con subvención a costos capitales, arancelarios y un aumento en la tarifa de transporte. 74
Figura 22 VAN al décimo año con subvención al costo del combustible..... 75
Figura 23 Precio requerido de hidrógeno para obtener un VAN igual a 0 en cada país 76
Figura 24 VAN de los proyectos de buses hidrógeno y a baterías al décimo año 77

Índice de contenidos

1. Introducción 1

1.1 Objetivos del estudio 2
1.1.1 Objetivo general 2
1.1.2 Objetivos específicos 2

1.2 Alcances y exclusiones 2

1.3 Metodología del estudio 3

2. Diagnóstico internacional 4

2.1 Electromovilidad a baterías e hidrógeno 4
2.1.1 Electromovilidad a baterías 4
2.1.2 Electromovilidad con hidrógeno 6
2.1.3 Comparación de tecnologías- electromovilidad 7

2.2 Estaciones de repostaje de BEV y FCEV 9
2.2.1 Estaciones de repostaje de BEV 9
2.2.2 Estaciones de recarga de FCEV 12
2.2.3 Comparación de tecnologías- estaciones de repostaje 17

2.3 Seguridad 18
2.3.1 Normativa de seguridad 18
2.3.2 Consideraciones prácticas de seguridad en vehículos e infraestructura 20

2.4 Huella de carbono 21

2.5 Proyectos de electromovidad a hidrógeno en el mundo 22
2.5.1 Modelos de negocios y estrategias de mercado internacional 23

2.6 Diagnóstico tecnológico y normativo internacional 25

3. Diagnóstico Latam: foco Red de Aprendizaje 27

3.1 Análisis de estudios por país y experiencias internacionales 27

3.2 Planificación estratégica en los países de la Red RH2 28

3.3 Normativa nacional sobre vehículos e infraestructura de hidrógeno 30

3.4 Instrumentos de financiamiento y subsidios disponibles 32

3.5 Disponibilidad de hidrógeno en países de la RedH2R 35

3.6 Barreras y oportunidades en zonas urbanas y aisladas 36

3.7 Proyectos de electromovilidad con hidrógeno y HRS 39
3.7.1 Modelos de negocios y estrategias de mercado en Latam 43

3.8 Diagnóstico de regulación, financiamiento y capital humano en Latam 45

4. Validación de mercado 47

4.1 Principales barreras operativas y recomendaciones 48

5. Bases de simulación 50

5.1 Supuestos y alcances de las herramientas de simulación 50

5.1.1 Consideraciones técnicas 50

5.1.2 Consideraciones económicas 51

5.2 Estructura de las herramientas de simulación 51

5.2.1 Base de datos 51

5.2.2 Inputs de simulación 56

5.2.3 Resultados de simulación 56

5.3 Modelo matemático de las herramientas de simulación 57

5.3.1 Ajuste de autonomía 57

5.3.2 Pronóstico de costos de hidrógeno y electricidad 57

6. Casos de estudio 59

6.1 Caso 1: Comparación con tecnologías de diésel 60

6.2 Caso 2: Comparación de desempeño FCEV y BEV 62

6.2.1 Camiones 62

6.3 Buses 65

6.4 Caso 3: Comparación entre países 72

6.4.1 Camiones 72

6.4.2 Buses 76

6.5 Análisis de los casos de estudio 77

7. Conclusiones y recomendaciones 80

7.1 Conclusiones 80

7.2 Recomendaciones 81

8. Referencias 84

1. Introducción

El sector transporte es una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, representando cerca del 21 % de las emisiones de CO_2. En América Latina, esta cifra puede ser aún mayor debido a la alta dependencia de combustibles fósiles y el envejecimiento del parque vehicular [1]. Las emisiones generadas por el sector transporte contribuyen significativamente al cambio climático y la contaminación urbana, afectando la calidad del aire y la salud pública, lo que impulsa la búsqueda de soluciones sostenibles.

Múltiples países de Latinoamérica están explorando vías para descarbonizar su matriz energética, en línea con sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) establecidas bajo el marco del Acuerdo de París. En esta región, el transporte representa alrededor del 15 % de las emisiones de CO_2, lo que plantea un desafío relevante. Además, América Latina y el Caribe es la segunda región más urbanizada del mundo: 8 de cada 10 personas viven en ciudades. A pesar de estos retos, la región posee una ventaja comparativa significativa: el 64 % de su matriz eléctrica proviene de fuentes renovables, frente al 39 % promedio a nivel mundial [2]. Esta condición ofrece una oportunidad estratégica para impulsar tecnologías de movilidad con propulsión eléctrica.

Dentro de las opciones con mayor potencial de descarbonización a nivel global se encuentra el reemplazo de flotas de vehículos con altos niveles de emisión de GEI por vehículos eléctricos, específicamente en actividades de transporte de carga (camiones) y de pasajeros (buses). Los avances tecnológicos emergentes han permitido el desarrollo de alternativas viables para la descarbonización del sector transporte, siendo las más importantes la **electromovilidad basada en baterías eléctricas (Battery Electric Vehicles, BEV)** y **en celdas de combustible de hidrógeno (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV).**

Los BEV han demostrado ser una opción eficiente para aplicaciones urbanas o de recorridos cortos debido a su alta eficiencia energética y costos operativos competitivos. Las baterías de iones de litio siguen liderando el mercado, aunque la investigación avanza hacia baterías con nuevos materiales que buscan mejorar la densidad energética y reducir los tiempos de carga. En un estudio reciente de la Agencia Internacional de Energía (IEA) [3], se estimó que la flota mundial de BEV se incrementó exponencialmente de 17 000 a más de 10 millones en la década 2010-2020 (con una tasa de crecimiento anual compuesto promedio superior al 89 %), donde prácticamente la mitad se encuentra en China [4]. Sin embargo, la baja autonomía (entre 200 y 350 km por carga) de estos vehículos y la consecuente necesidad de infraestructura de carga representan desafíos importantes, especialmente para aplicaciones interurbanas o de largo alcance.

Los FCEV destacan como una solución posible para dichas rutas extensas y operaciones de carga pesada, donde los BEV pierden competitividad. Una celda de combustible de hidrógeno es un dispositivo que actúa como convertidor de energía, transformando directamente la energía química de los reactantes en energía eléctrica. Este proceso ocurre sin necesidad de pasar por las etapas intermedias de energía térmica y mecánica, lo que le permite alcanzar una eficiencia superior a la de un motor de combustión interna [5]. Su tiempo de reabastecimiento es similar al de los combustibles fósiles tradicionales y ofrecen una mayor autonomía en comparación con las baterías eléctricas. No obstante, su adopción enfrenta barreras significativas dadas por la condición emergente del mercado, como la carencia actual de estaciones de recarga de hidrógeno **(Hydrogen Refuelling Stations, HRS)** los costos asociados a la producción y distribución del hidrógeno renovable. A consecuencia de esto, distintas instituciones estatales y asociaciones civiles e industriales de países como Argentina, Chile, México, Colombia, Uruguay y Costa Rica trabajan en la elaboración de un marco regulatorio que facilite las condiciones para la implementación de proyectos de aplicación de hidrógeno renovable.

En este contexto, la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH ha buscado impulsar las oportunidades de inversión en hidrógeno renovable en Latinoamérica, apoyando la creación de un entorno atractivo, proporcionando financiamiento para proyectos en condiciones favorables, promoviendo la colaboración en I+D y fomentando la cooperación empresarial y la transferencia de conocimiento y tecnología. Para ello, una de las iniciativas ha sido la creación de la **Primera Red de Aprendizaje en Hidrógeno Renovable** (Red RH2), en la que participan 31 compañías con proyectos de hidrógeno renovable en países de Latinoamérica como Chile, Argentina, México, Uruguay, Colombia y Costa Rica. La Red RH2 se basa en una metodología de redes de aprendizaje, consolidadas en sesiones de reunión con representantes de las compañías involucradas, en donde se comparte información técnica y comercial valiosa de proyectos basados en hidrógeno y se forjan colaboraciones para facilitar su desarrollo.

Las 31 empresas e instituciones que componen la Red RH2 se distribuyen dentro de 6 países foco del estudio en la siguiente distribución: 1 en Argentina, 5 en Colombia, 1 en Costa Rica, 19 pertenecen a Chile, 3 a México y 2 a Uruguay.

El presente estudio busca recoger información disponible en literatura y desde actores del mercado, presentes en la Red RH2 y externos a esta, con el fin de suplir un marco conceptual sólido que facilite el desarrollo de proyectos de electromovilidad con hidrógeno en Latinoamérica, abordando tópicos técnicos, regulatorios y comerciales acerca de la tecnología y la infraestructura necesaria para su implementación.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Elaborar un análisis de viabilidad comparativa de proyectos de electromovilidad basados en hidrógeno renovable, con foco en el transporte de carga (camiones) y de pasajeros (buses) dentro de los países que conforman la Red RH2, considerando aspectos técnicos, regulatorios y comerciales de la tecnología.

1.1.2 Objetivos específicos

Objetivo específico 1

Realizar un diagnóstico de la región, con foco en los países de la Red RH2, sobre el estado actual y potencial de la electromovilidad con hidrógeno renovable, cubriendo aspectos tecnológicos, financieros, políticas públicas y proyectos.

Objetivo específico 2

Validar con la industria y el sector público de los países de la Red RH2 el diagnóstico regional y acompañar técnicamente las sesiones de trabajo.

Objetivo específico 3

Simular casos de implementación de proyectos de buses y camiones que empleen hidrógeno renovable (H_2) para los países de la Red RH2, y realizar un análisis comparativo con tecnologías alternativas como diésel y electromovilidad a batería, en términos técnicos, económicos y operativos.

Objetivo específico 4

Analizar las diferencias y similitudes de los países de la Red RH2 respecto a otros países con mayor desarrollo en el mercado, indicando barreras y oportunidades, y entregando recomendaciones para la implementación, con acciones de los actores privados (miembros de la Red) para la promoción de la infraestructura.

1.2 Alcances y exclusiones

El mercado del hidrógeno y sus derivados es altamemente dinámico a nivel mundial y sensible a la geopolítica global, por lo que la información presente en este informe debe ser utilizada como una guía y rectificada según la institución pertinente. En términos técnicos, este estudio no reemplaza un análisis tecnoeconómico de casos específicos, sino que se expone como una herramienta para apoyar la toma

de decisiones y la evaluación tecnológica. Dado el impacto del costo de la electricidad en el precio del hidrógeno y, por ende, la sensibilidad a la locación del proyecto de generación de hidrógeno, se excluyen de las simulaciones las HRS, quedando los costos de generación y distribución englobados en parámetro de entrada “precio del hidrógeno”. Adicionalmente, este estudio no entrega modelos de negocio empresariales, sino se enfoca en las estrategias que adoptan los países respecto al rol que quieren desempeñar en la cadena de valor del hidrógeno. No obstante, se establecen algunas implicancias para los actores privados a partir de estas.

1.3 Metodología del estudio

El estudio se desarrolló en tres etapas principales:

Primero, se estableció el estado actual de la tecnología y la viabilidad comercial de la electromovilidad impulsada por hidrógeno y baterías para realizar un diagnóstico regional. Para ello, se levantaron datos sobre el rendimiento de buses y camiones, así como sobre las necesidades de infraestructura para HRS. Además, se identificaron los factores clave que determinan la viabilidad de aplicar el transporte impulsado por hidrógeno en la región de América Latina y el Caribe, destacando sus ventajas comparativas frente a la electromovilidad a baterías.

Esta revisión se basó en diversas fuentes: artículos científicos publicados desde 2020 para la información técnica de camiones, buses y HRS; información comercial obtenida de fuentes directas y actores del sector que han realizado cotizaciones de vehículos y componentes asociados; repositorios de acceso público, políticas públicas e informes específicos para recopilar la perspectiva de cada país miembro de la Red RH2 respecto a proyectos anunciados y planificación regulatoria para la integración de la tecnología.

En segundo lugar, para complementar la información documental y validar el diagnóstico regional, se realizaron entrevistas presenciales y temáticas a actores del sector privado involucrados en proyectos de transporte con hidrógeno o baterías, así como a representantes del sector público que han acompañado iniciativas de hidrógeno y movilidad sostenible en los países de la Red RH2. Se contactaron actores por medio de la Red de Aprendizaje, contacto directo, acercamiento durante conferencias de hidrógeno locales y redes sociales como LinkedIn.

Finalmente, se desarrolló una herramienta de cálculo en Excel, que denominaremos como “simulación” para evaluar proyectos de electromovilidad de camiones y buses en rutas específicas de los países de la Red RH2. Esta herramienta permitió analizar la viabilidad técnica y económica de modelos reales bajo las condiciones particulares de cada país. Se aplicó a casos concretos en recorridos cortos (50 a 200 km) y largos (más de 200 km), obteniendo un desglose de costos, indicadores de rentabilidad (VAN) y un resumen operativo de cada vehículo en su ruta correspondiente.

2. Diagnóstico internacional

A fin de sustentar el análisis de viabilidad de proyectos de electromovilidad basados en hidrógeno renovable, es fundamental comprender en detalle las tecnologías disponibles, sus características operativas, y las condiciones técnicas que determinan su implementación. En las siguientes secciones se revisan las principales opciones tecnológicas actuales de propulsión eléctrica: BEV y FCEV, junto con sus ventajas, limitaciones y condiciones de uso óptimas. Asimismo, se presentan comparaciones entre ambas soluciones en términos de autonomía, eficiencia, costos operativos, infraestructura requerida y sostenibilidad ambiental. El análisis incluye también la descripción de la infraestructura necesaria para su despliegue —en particular las estaciones de recarga y repostaje (electrolineras y HRS)— y los requisitos normativos asociados a su seguridad. Se examinan además los modelos comerciales existentes, los actores tecnológicos presentes en el mercado global y algunos casos de referencia a nivel internacional que permiten ilustrar el grado de madurez y aplicabilidad de estas soluciones en distintos contextos.

2.1 Electromovilidad a baterías e hidrógeno

2.1.1 Electromovilidad a baterías

Los BEV utilizan estas como elemento central para el almacenamiento y la conversión de energía, basándose en la disponibilidad de electricidad como materia prima. Para que el ciclo completo —desde la generación hasta el uso final— sea considerado bajo en emisiones, el abastecimiento eléctrico debe proceder de fuentes renovables.

En este contexto, los BEV han emergido como una solución clave para la transición hacia una movilidad más sostenible, destacándose por su alta eficiencia energética y bajos costos operativos. Su adopción ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, impulsado por avances tecnológicos, políticas públicas y cambios en el mercado global.

Según la IEA, la flota mundial de BEV pasó de 17 000 unidades en 2010 a más de 10 millones en 2020, con una tasa de crecimiento anual compuesta superior al 89 %. China lidera este mercado, concentrando aproximadamente el 50 % del total de vehículos eléctricos a nivel global. En 2021, las ventas de BEV se duplicaron respecto al año anterior, alcanzando un récord de 6.6 millones de unidades vendidas. En 2022, se estimó que el 13 % de los autos nuevos vendidos en el mundo serían eléctricos. Las proyecciones indican que, si se mantiene el crecimiento experimentado en los últimos dos años, las emisiones de CO_2 de los automóviles podrían alinearse con el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050, y la flota mundial de BEV podría alcanzar entre 145 y 230 millones de vehículos en 2030 [6].

El crecimiento de los BEV ha sido impulsado por varios factores, siendo el apoyo político sostenido uno de los más determinantes. En 2021, el gasto público en subvenciones e incentivos casi se duplicó, alcanzando los 30 000 millones de dólares estadounidenses. Además, muchos países han fijado metas ambiciosas para retirar del mercado progresivamente los vehículos con motores de combustión interna. Por su parte, los fabricantes de automóviles también han asumido compromisos para electrificar sus flotas, reforzando la transición hacia una movilidad más sostenible. Países como Noruega lideran en participación de BEV, donde estos ya han superado en ventas a los vehículos convencionales. A nivel mundial, las ventas de BEV han aumentado sostenidamente desde 2016 hasta 2023, como se observa en la **Figura 1** mientras que en reportes de la IEA se proyecta un crecimiento anual promedio del 36 % entre 2022 y 2030 [3].

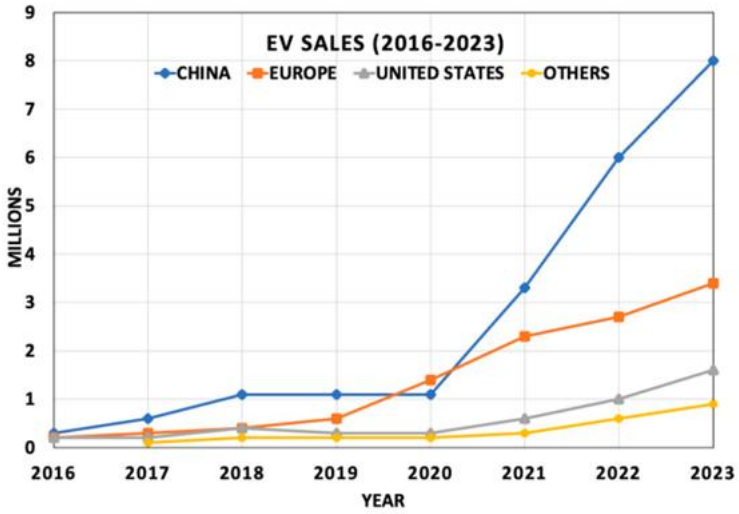

Figura 1 Venta de vehículos eléctricos en período 2016-2023 [3].

La adopción de BEV conlleva una serie de beneficios ambientales, económicos y operativos, entre los cuales destacan:

- **Eficiencia energética:** Los BEV son entre tres y cinco veces más eficientes que los motores de combustión interna.
- **Reducción de emisiones contaminantes a nivel local:** La ausencia de emisiones directas de CO_2, NOx y partículas contribuye a mejorar la calidad del aire en entornos urbanos.
- **Reducción en costos de mantenimiento:** Los BEV requieren menos mantenimiento debido a la ausencia de componentes móviles asociados a aceites lubricantes y sistemas de combustión interna.

No obstante, pese a su crecimiento sostenido, la electromovilidad basada en baterías enfrenta desafíos que pueden limitar su adopción masiva, especialmente en el transporte de carga y en rutas de larga distancia:

- **Autonomía:** La mayoría de los BEV tiene un rango de entre 200 y 350 km por carga, lo que puede ser insuficiente para aplicaciones de largo alcance terrestre. En el caso de los camiones de carga pesada, el peso y el espacio que ocupan las baterías representan un problema importante. Se estima que, para lograr una autonomía razonable, un camión eléctrico debería sacrificar aproximadamente un 33 % de su carga útil. Esta reducción impacta la eficiencia operativa y puede implicar mayores costos logísticos, dado que se transporta menos mercancía por viaje. Por ejemplo, algunos modelos de buses como King Long recorren alrededor de 250 km, mientras que ciertos camiones Volvo alcanzan los 300 km [7]. Si bien se están desarrollando tecnologías con mayor autonomía, estas aún no son comerciales. En cuanto a costos, esta tecnología tiene un valor promedio aproximado de 460 000 USD [8].
- **Infraestructura de carga**: La disponibilidad de estaciones de carga, especialmente para recorridos interurbanos y transporte pesado, continúa siendo un desafío debido a las limitaciones que ofrece a las tecnologías impulsadas por celdas de combustible al competir bajo las mismas condiciones con alternativas de transporte diésel o eléctricas que cuentan con mayor disponibilidad de forma transversal en los territorios.
- **Tiempos de carga:** Aunque existen cargadores rápidos de corriente continua (DC Fast Charging), la carga completa de un BEV puede tomar entre 2 y 3 horas con esta tecnología, o de 10 a 13 horas con carga normal [9]. Esto limita el tiempo efectivo de operación del vehículo en comparación con el repostaje convencional de combustibles fósiles.

- **Autodescarga:** Proceso natural en las baterías, cuya velocidad depende del tipo y las condiciones de almacenamiento. En baterías de litio, es esencial mantenerlas a baja temperatura y en ambientes secos para minimizar este efecto [10].

Estos factores han llevado a que la electromovilidad basada en baterías sea una alternativa principalmente viable para aplicaciones urbanas y recorridos de corta distancia.

2.1.2 Electromovilidad con hidrógeno

Los FCEV utilizan un reactor electroquímico para convertir el hidrógeno y el oxígeno del aire en electricidad y agua. La tecnología más utilizada es la celda de combustible de membrana de intercambio de protones debido a su baja inercia ante cambios de demanda energética, lo que permite su operación en vehículos con consumo variable en ruta. El hidrógeno, por su parte, se almacena a alta presión en tanques fabricados con fibra de carbono u otros materiales resistentes y livianos.

Actualmente, los mayores avances en el uso del hidrógeno con pilas de combustible se concentran en el sector transporte, en particular en vehículos livianos, como los modelos Toyota Mirai y Hyundai Nexus. Muchos fabricantes de automóviles están invirtiendo fuertemente en investigar formas más eficientes y económicas de utilizar el hidrógeno como vector energético. A pesar de que los modelos de negocios con FCEV aún no son plenamente rentables, numerosos países están financiando proyectos piloto para impulsar su adopción. Durante 2023, algunos países de Europa programaron un aumento en el uso de buses FCEV, mientras que en ciudades de Estados Unidos se continúa experimentando con esta tecnología.[11]

Entre las principales ventajas de la electromovilidad a hidrógeno respecto a la basada en baterías destacan los tiempos de recarga, la autonomía y la eficiencia operativa:

- **Tiempos de recarga:** Cada parada de repostaje se completa en aproximadamente 10 minutos, similar a una parada convencional de diésel [12]. El repostaje de hidrógeno se realiza de acuerdo con normas internacionales, como la norma SAE J2601, que establecen protocolos considerando la presión, el caudal y la temperatura. La velocidad de llenado es de aproximadamente 1 kg/minuto, un promedio de 5 minutos para un vehículo de pasajeros y entre 8 y 20 minutos para buses y camiones, dependiendo la temperatura ambiente [13][14]

- **Autonomía:** Distintos modelos podrían alcanzar autonomías cercanas a los 480 km. Según el proyecto JIVE, el consumo estimado de hidrógeno es de 5,5 a 9 kg cada 100 km recorridos [15].

- **Eficiencia energética:** Las celdas de combustible presentan una mayor eficiencia de conversión energética que los motores de combustión interna. Sin embargo, la tecnología de los motores convencionales cuenta con más de un siglo de desarrollo y su reconversión hacia combustibles gaseosos sería relativamente sencilla [11].

Diversos fabricantes han desarrollado buses y camiones equipados con celdas de combustible de hidrógeno, con más de diez marcas que cuentan actualmente con modelos en fase avanzada de producción o en etapa de pruebas. A continuación, se destacan algunas de las principales empresas que lideran este mercado en el segmento de camiones:

A pesar de ser un mercado emergente, existen múltiples marcas desarrollando FCEV, siendo algunos ejemplos para camiones:

1. Hyundai: Camiones que van desde 4x2 hasta 6x4 del modelo Xcient Fuel Cell [16] con una autonomía cercana a los 400km y un tiempo de repostaje inferior a los 20 minutos.
2. Nikola Corporation: Dedicada al diseño y fabricación de camiones de transporte pesado con celdas de combustible de hidrógeno, con el modelo TRE FCEV como principal desarrollo. Posee

un tracto camión llamado “Two” el cual alcanza autonomías que van desde 800 a 1 200 km. Y que permite transportar cargas sobre 30 ton. [17]

3. Dongfeng: En noviembre de 2024, Dongfeng Liuzhou Motor presentó su modelo Chenglong H5V, el cual posee una capacidad de carga sobre las 30 toneladas [18].
4. Sinotruk: Lanzó su modelo Shandeka, el cual promete una autonomía cercana a los 1 200 km, y una capacidad de carga alrededor de las 40 toneladas, además de ser cargado en máximo 20 minutos [19].
5. Hybot: Primer camión impulsados por hidrógeno en estado gaseoso con una autonomía superior a 1 000 km y un rendimiento 20% mayor que la competencia, además de contar con una capacidad de transportes 49 toneladas [20].
6. Hyzon: ha anunciado la entrega de 29 camiones eléctricos de pila de combustible que serán utilizados por un importante conglomerado siderúrgico en China, posee un peso bruto vehiculas de 49 ton, no se tiene información sobre su autonomía, pero el tiempo de repostaje es de 15 minutos.

En cuanto a buses, existen marcas con presencia en los países de la Red, tales como:

1. Marcopolo: Marca presente en Colombia, participó en la alianza para el proyecto del transporte público TransMilenio en Bogotá y cuenta con fábrica nacional [21]. Actualmente se posiciona como representante de la marca del Wright Bus [22].
2. Wright Bus: Empresa de origen irlandés con presencia en europa pionera en la construcción del primer bus de dos pisos impulsado por hidrógeno, el StreetDeck Hydrogen, complementando su línea con el modelo de un piso GB Kite Hydrogen [23].
3. Solaris: Es una marca del grupo CAF con presencia internacional. Uno de los principales fabricantes europeos de buses sostenibles, especializado en modelos de transporte público basados en celdas de combustible, como el Urbino 12 Hydrogen y el Urbino 18 Hydrogen [24].
4. Reborn Electric Motors: Este fabricante chileno apuesta por la ingeniería local para realizar retrofits a buses eléctricos y ha participado en la fabricación del primer bus de hidrógeno producido en Chile, marcando un hito en la innovación tecnológica de la región [25].

En síntesis, los FCEV se perfilan como una solución clave para la transición hacia una movilidad más sostenible, destacándose por su mayor autonomía y tiempos de recarga reducidos, lo que los convierte en una alternativa atractiva para aplicaciones de transporte de carga pesada y movilidad urbana.

2.1.3 Comparación de tecnologías- electromovilidad

Como punto de referencia, se consideran los costos asociados a la operación actual del transporte diésel, dado que esta industria es la más consolidada tanto para camiones como para buses. A continuación, se presenta la **Tabla 1**, con la comparación de las principales características de cada tecnología.

Tabla 1 Comparación de tecnologías para camiones- baterías e hidrógeno con respecto al diésel.

	Camión Diésel	Camión Eléctrico (BEV)	Camión de Hidrógeno (FCEV)
Tecnología de propulsión	Motor térmico a combustión interna	Motor eléctrico con batería de litio	Motor eléctrico alimentado por pila de hidrógeno
Autonomía típica	800–1 200 km	200–500 km (hasta 800 km en modelos nuevos)	400–1 000 km
Tiempo de recarga/reabastecimiento	5–10 minutos	1–8 horas (según potencia de carga)	10–30 minutos (según recarga necesaria y condiciones de HRS)
Tipo de emisiones en operación	CO_2, NOx, PM	Nulas (si la fuente eléctrica es limpia)	Nulas (emite vapor de agua)

Emisiones en cadena de valor ($kgCO_{2eq}$/km)	0.9 - 1.2	0.2 - 0.3 (si 90% de la electricidad es renovable)	0.3 - 0.5 (usando H_2 producido con electrólisis)
Costo inicial (aproximado respecto a camión diésel)	1x	2x	3x
Rendimiento operativo (km /unidad de carga)	2.0 a 2.8 [km/L de Diesel]	0.11 a 0.5 [km/kWh]	10.7 a 12.9 [km/kg de H2]
Vida útil del sistema	1–1.5 millones de km	Similar, aunque las baterías se degradan un 80% entre 8 a 10 años de operación	Similar, con menor desgaste que diésel sin embargo requiere de un mantenimiento mayor
Mantenimiento	Mantenimiento habitual según indicaciones de fabricante. Gran número de elementos en movimiento,	Menos partes móviles. Requiere mantenimiento especializado	Presencia de valvular y almacenaje de alta presión. Requiere mantenimiento especializado
Uso ideal	Todo tipo de rutas, alta disponibilidad de combustible	Distribución urbana o trayectos medianos con acceso a punto de carga	Rutas de larga distancia donde el peso y recarga rápida permiten una ventaja operativa

La tabla anterior presenta las principales características de las tecnologías comparadas, dentro de los parámetros cuantificables se destaca la diferencia en autonomía, tiempo de recarga y rendimiento, los cuales en combinación con otras características operacionales y de mantenimiento permiten identificar el uso ideal para cada una de las tecnologías, pudiendo adaptarse de forma más eficiente según el tipo de operación. En particular, los BEV han avanzado rápidamente, logrando reducir sus costos de implementación en menos de una década, gracias en parte a la disponibilidad de electricidad, a diferencia de los FCEV que depende del acceso a hidrógeno. Sin embargo, presentan limitaciones operativas, como menor autonomía y mayores tiempos de recarga, lo que restringe su uso para aplicaciones de largo alcance. Además, a pesar de no emitir contaminantes locales durante la operación, la electromovilidad a baterías conlleva impactos asociados al recambio de baterías de litio, cuya vida útil se degrada en más de un 80% entre 8 y 12 años. Por lo tanto, se prevé que ambas tecnologías coexistan para cubrir distintos nichos operativos de forma complementaria, maximizando la eficiencia y minimizando el impacto ambiental.

Otro aspecto por considerar es el rendimiento operativo, definido como la cantidad de kilómetros recorridos por unidad de energía. Si bien este valor varía según el modelo y las condiciones de operación, para este análisis se consideraron rangos promedio para camiones pesados que realizan trayectos interurbanos cargados. Factores como la resistencia del viento, las pendientes y el peso transportado serán abordados en capítulos posteriores.

A continuación, se presentan en la **Tabla 2** los valores de combustibles y electricidad en distintos países, junto con una estimación de costos operativos expresados en dólares por kilómetro recorrido [USD/km]. Cabe destacar que dentro de los costos operativos considerados en la **Tabla 2**, se toma en cuenta los asociados al mantenimiento programado del vehículo, seguros y permiso de circulación.

Tabla 2 Valores de carga y costos operativos relacionados al consumo

	Argentina	Chile	Colombia	Costa Rica	México	Uruguay
Valor carga Diesel [USD/L] [26]	1.19	1.01	0.68	1.05	1.37	1.16

Valor carga de baterías [USD/kWh] [27]	0.26	0.20	0.13	0.18	0.22	0.12
Costo operativo Diesel [USD/km]	0.43 a 0.6	0.36 a 0.51	0.24 a 0.34	0.38 a 0.53	0.49 a 0.69	0.41 a 0.58
Costo operativo Eléctricos [USD/km]	0.52 a 2.36	0.40 a 1.82	0.26 a 1.18	0.36 a 1.64	0.44 a 2.00	0.24 a 1.09

De esta tabla se desprende que el costo por kilómetro de los BEV es altamente sensible al rendimiento del vehículo, reflejado en un mayor rango de costos operativos en relación con la alternativa diésel. Aunque la carga eléctrica puede costar aproximadamente la mitad de una carga de diésel, la menor autonomía y la mayor frecuencia de recarga incrementan el costo operativo real por kilómetro, acercándolo más a los de la tecnología diésel de lo que suele percibirse inicialmente.

En cuanto al mantenimiento, tanto los BEV como los FCEV presentan costos menores frente a la tecnología diésel, debido a la menor cantidad de componentes móviles. En el caso de los BEV, el reemplazo de baterías de litio representa uno de los puntos diferenciadores, dado que cada camión puede necesitar entre tres y cuatro paquetes de baterías, lo que implica un costo significativo. Para los FCEV, los elementos críticos incluyen los tanques de hidrógeno a alta presión, válvulas, conectores y el fuel cell stack, que puede perder eficiencia con el tiempo por impurezas. Esto puede requerir limpiezas químicas (de 1 000 a 5 000 USD) o, en algunos casos, el reemplazo total de la celda, con valores que oscilan entre 5 000 y 60 000 USD, según el tamaño del sistema.

En resumen, los BEV han demostrado ser efectivos en trayectos cortos y medianos, en gran parte gracias a la disponibilidad de electricidad. No obstante, sus limitaciones técnicas —como la autonomía reducida y los tiempos de recarga— abren espacio a los camiones FCEV como una alternativa competitiva para el transporte de larga distancia de bajas emisiones. Aunque la oferta actual es limitada y los costos aún son elevados, se prevé que esta tecnología evolucione con mejoras como el intercambio de baterías (battery swap) y la reconversión de unidades existentes (retrofit). La expansión de infraestructura de recarga y repostaje será clave para acelerar su adopción.

2.2 Estaciones de repostaje de BEV y FCEV

2.2.1 Estaciones de repostaje de BEV

La infraestructura de **recarga de BEV** juega un papel crucial, ya que el despliegue de cargadores afecta directamente al rendimiento de las baterías [8]. Tal como se esquematiza en la **Figura 2**, dentro de los tipos de cargadores disponibles en las estaciones se encuentran:

- Cargadores de corriente alterna (AC): Estos pueden conectarse fácilmente a la red eléctrica, ya que el vehículo cuenta con un inversor que convierte la corriente alterna en corriente continua. Sin embargo, el tiempo de carga puede extenderse hasta 10 horas, dependiendo del voltaje y las características del vehículo.
- Cargadores rápidos de corriente continua (DC): Estos permiten cargar la batería directamente, reduciendo así los tiempos de carga. No obstante, trasladan una mayor exigencia en potencia a la red eléctrica, lo que requiere infraestructura especializada.

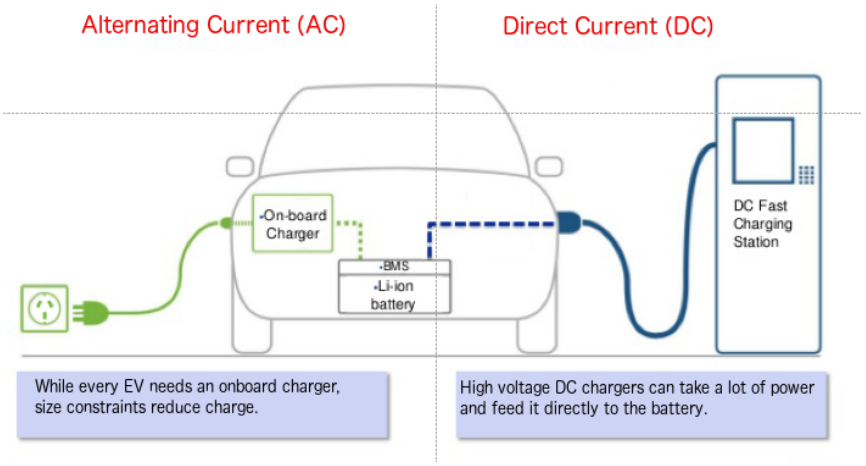

Figura 2 Esquema de recarga para cargadores AC y DC

La velocidad de carga de los BEV depende tanto de la capacidad de la batería del vehículo como de la potencia del cargador. La **Figura 3** presenta una estimación del tiempo requerido para cargar una batería de 24 a 90 kWh, según la potencia del cargador:

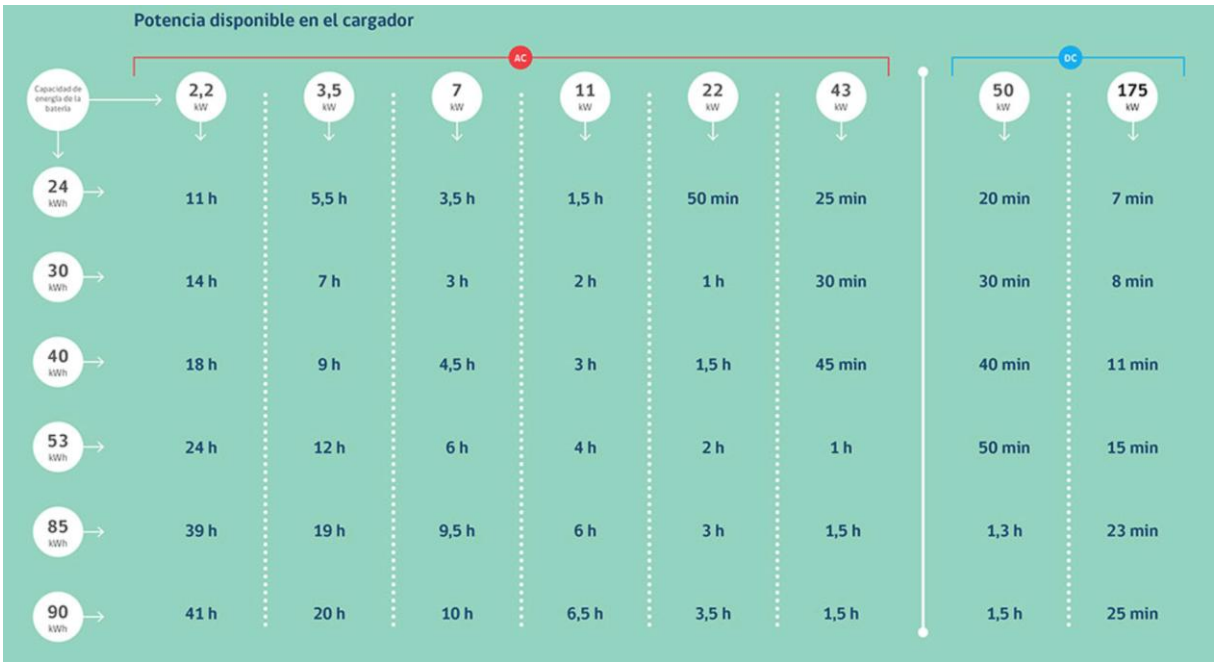

Figura 3 Tiempo estimado de carga según potencia del cargador [28]

Además de la velocidad de carga, existe una amplia variedad de conectores, cuyo uso varía según el país o fabricante. Modelos típicos se muestran en la **Figura 4**, donde se destacan como los más comunes comercialmente:

- CCS1, de origen japonés
- CCS2, utilizado principalmente en Europa
- Tesla, exclusivo para el mercado norteamericano
- GB/T, estándar chino

Aunque la elección de conectores responde en parte a dinámicas geopolíticas y estrategias comerciales, la diversidad de marcas y modelos ha obligado a las electrolineras a ofrecer múltiples opciones de

conectividad. Esto ha derivado en la instalación de adaptadores, transformadores y compatibilidad cruzada para permitir la operación de distintas tecnologías en un mismo país.

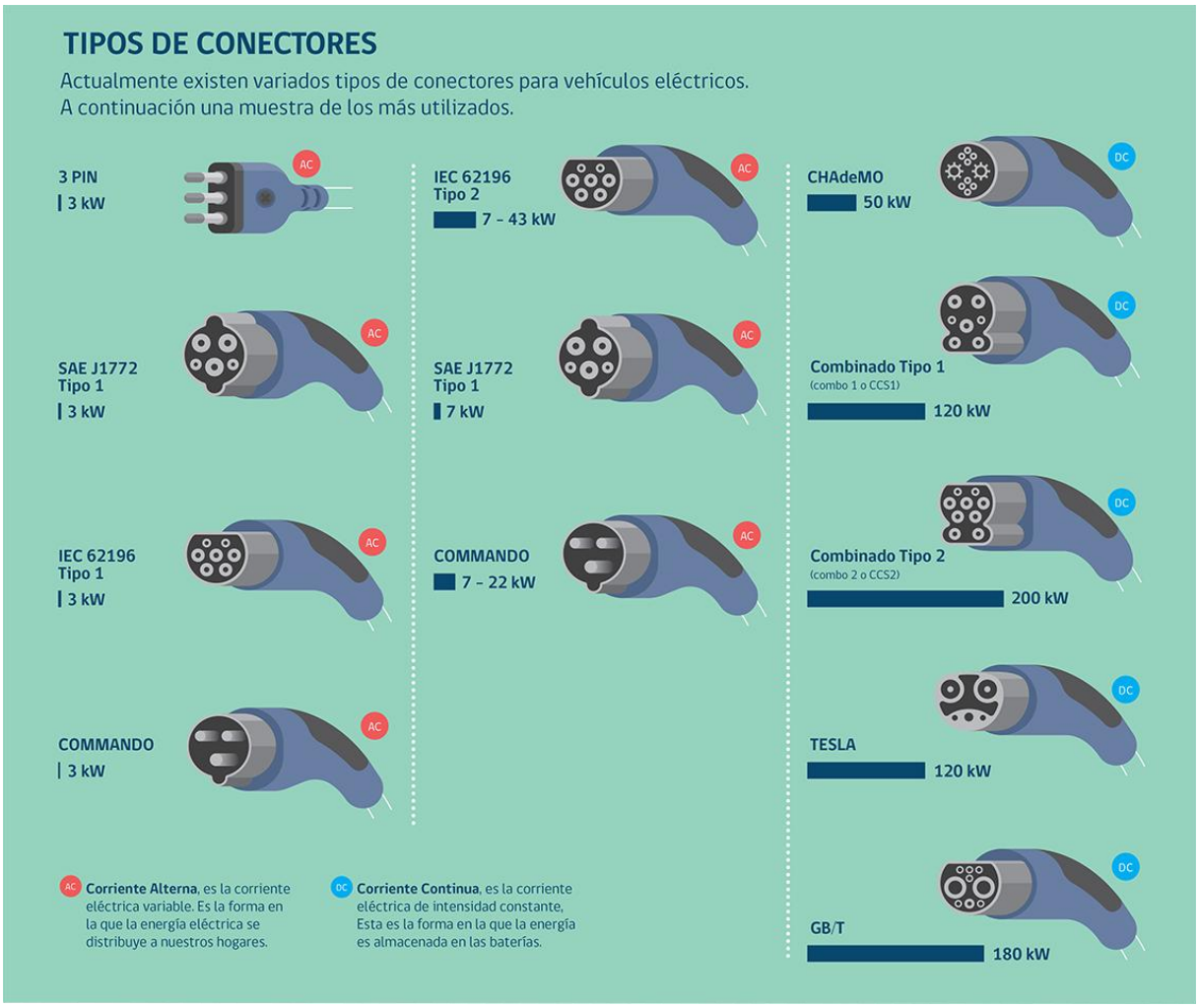

Figura 4 Tipos de cargadores disponibles para BEV [28]

La operación de las estaciones de carga para BEV requiere condiciones mínimas de seguridad eléctrica, conectividad y control. Estas estaciones se conectan directamente a la red de distribución eléctrica y, siempre que cuenten con un suministro continuo, permanecen disponibles para abastecer vehículos en forma inmediata.

Desde el punto de vista operativo, el proceso de carga implica una secuencia estándar que contempla la conexión segura del vehículo, el monitoreo de indicadores de funcionamiento y la finalización adecuada del ciclo, aspectos que están automatizados en la mayoría de los sistemas actuales. Para garantizar una operación segura, es esencial que los equipos estén en buen estado, que los cables no presenten daños visibles y que no se realicen conexiones en condiciones de humedad o riesgo eléctrico.

En términos normativos, las estaciones deben incorporar medidas de protección eléctrica y sistemas de monitoreo remoto, junto con señalización clara y protocolos de actuación ante emergencias. Además, es recomendable seguir las disposiciones técnicas de la norma IEC 61851, que establece criterios de instalación, operación, mantenimiento y seguridad para infraestructuras de recarga de BEV.

2.2.2 Estaciones de recarga de FCEV

Las HRS son infraestructuras especialmente diseñadas para almacenar y dispensar hidrógeno de forma segura y eficiente. Dependiendo de su configuración y componentes, estas estaciones permiten comprimir, preenfriar y suministrar el gas a los vehículos de forma controlada, garantizando la compatibilidad con distintos tipos de vehículos y cumpliendo los requisitos de seguridad establecidos por fabricantes y normativa vigente.

Componentes

Todas las configuraciones de HRS integran componentes críticos que aseguran su funcionamiento seguro y confiable. Entre ellos destacan:

- **Compresores de alta presión**, que elevan el gas a los niveles requeridos por los vehículos (350 o 700 bar).
- **Tanques de almacenamiento** en distintos niveles de presión o criogénicos para hidrógeno líquido.
- **Sistemas automáticos y semiautomáticos de corte de emergencia (ESD)**.
- **Detectores de fugas de hidrógeno** en puntos críticos de la instalación.
- **Válvulas de alivio de presión (PRD)** y discos de ruptura.
- **Sistemas de ventilación forzada y venteo seguro** para dispersar eventuales fugas.

Una HRS puede integrar todos los componentes necesarios para estas funciones (ver **Figura 5**) o solo una parte de ellos, en caso de recibir el hidrógeno previamente comprimido y acondicionado para la recarga.

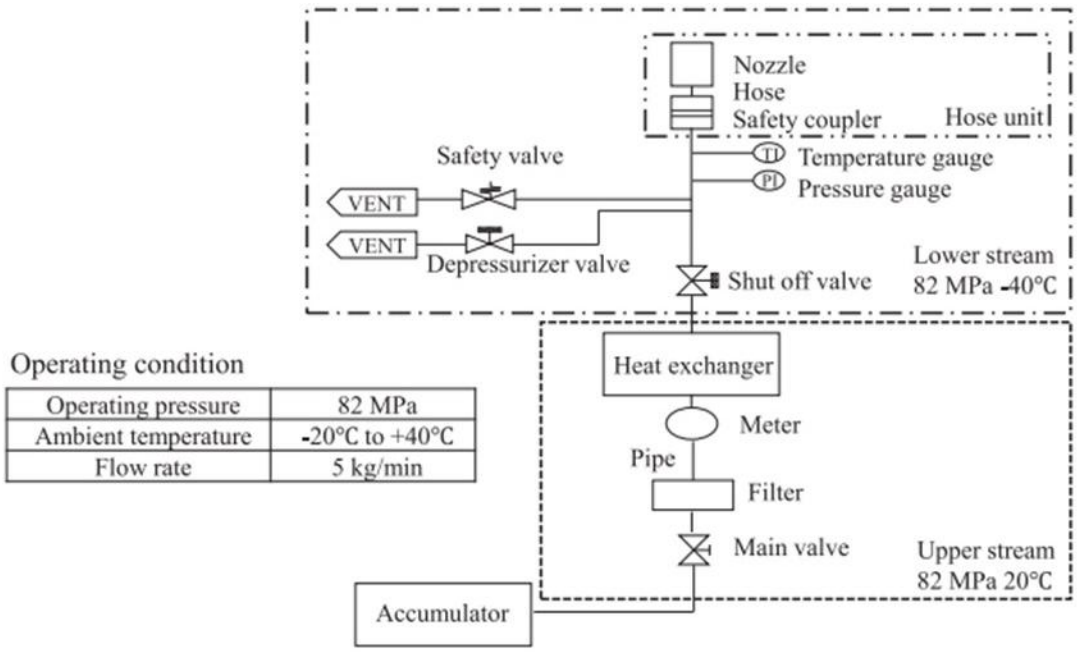

Figura 5 Ejemplo de estación de recarga de hidrógeno y sus principales componentes [29]

El componente clave es el **surtidor**, o boquilla (*nozzle*), que actúa como punto de conexión entre la HRS y el vehículo. Este debe cumplir estándares de seguridad y compatibilidad para abastecer diferentes tipos de vehículos a diversas presiones de trabajo. Actualmente, los estándares más utilizados son la **ISO 17268** y la **SAE J2600**, complementadas por las normas **SAE J2601** y **J2602**, que establecen tanto la

geometría de conexión como los protocolos de llenado, velocidad de recarga y nivel de control requerido para toda la estación.

Existen dos tipos principales de surtidores:

- **H35**, para operaciones de recarga a 350 bar, utilizado principalmente en vehículos pesados como buses, camiones y grúas horquilla.
- **H70**, para recarga a 700 bar, comúnmente aplicado en vehículos livianos como automóviles.

Dependiendo del fabricante, los surtidores pueden incorporar sistemas de comunicación digital y sensores adicionales para mejorar la operación y la seguridad. Actualmente, existen numerosos fabricantes de boquillas y estaciones completas, con orígenes en Europa, China y Estados Unidos, todos ellos compatibles con los estándares mencionados. Por ejemplo, las marcas **HQHP Houpu** (China) [30], **Hexagon Purus** (Alemania) [31] y **PDC Machines** (EE. UU.) [32] especifican esta compatibilidad en sus fichas técnicas. En la **Figura 6** y **Figura 7** se muestran ejemplos gráficos de las boquillas H35 y H70 de dos marcas europeas, destacando sus similitudesy compatibilidad.

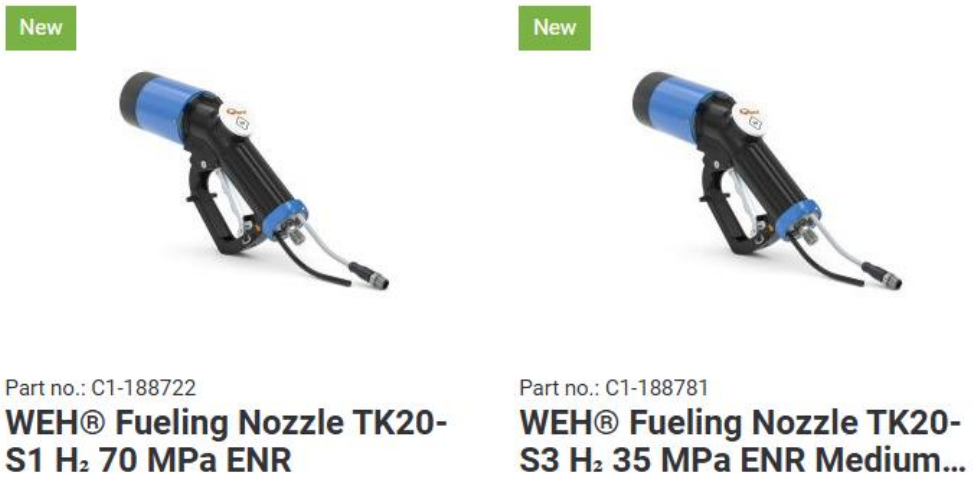

Figura 6 Ejemplos de boquillas de 35 y 70 MPa de la marca alemana WEH [33]



Figura 7 Ejemplos de boquillas de 35 y 70 MPa de la marca suiza Stäubli [34]

Operación

Para la operación, el gas de hidrógeno se comprime a una presión de aproximadamente 350-700 y se distribuye a través de un surtidor. Con la boquilla conectada, la estación se comunica con el vehículo a través de sensores ubicados alrededor de la abertura, por ejemplo, sensores infrarrojos, y monitorea los parámetros de presión y temperatura del tanque del vehículo durante el llenado. La carga puede realizarse de forma completa o pausada, según se configure en la estación. Las empresas de gas industrial han desarrollado sistemas de dispensación de combustible de hidrógeno que son seguros y fáciles de usar y estándares internacionales para garantizar la compatibilidad entre todas las estaciones de servicio y los vehículos [13].

Las estaciones de hidrógeno se instalan en sitios públicos o privados pertenecientes a los dueños de flotas de FCEV o de la propia estación, y las que actualmente ofrecen servicios de carga a clientes privados lo hacen en condiciones equivalentes a las estaciones tradicionales de combustibles líquidos. No obstante, si bien el dispensado puede ser por kg, cada fabricante recomienda un nivel mínimo de estanque de seguridad para garantizar el correcto funcionamiento del vehículo. A nivel global, la infraestructura de repostaje de hidrógeno se concentra principalmente en Estados Unidos, Europa y China, donde los usuarios particulares pueden localizar fácilmente estas estaciones mediante aplicaciones digitales. Entre ellas destacan H2.LIVE (Europa) [35], H2Stations.org (global) [36], H2-map.eu (Europa) [37], Hydrogen Fuel Cell Partnership Station Map – H2FCP (Estados Unidos) [38] y GLP Autogas Hydrogen Stations (China) [39].

Seguridad

Además de la compatibilidad técnica, las HRS deben cumplir con estrictos requisitos de seguridad definidos por normas internacionales como ISO, SAE y NFPA 2. A nivel local, estas instalaciones se rigen por la normativa vigente sobre hidrógeno, vehículos y estaciones de carga —en algunos casos denominadas *multicombustible* cuando integran más de un energético. Algunos países poseen una institución reguladora que fiscaliza el cumplimiento de ciertas medidas específicas, como en el caso de Chile, en donde se requiere autorización explícita de la SEC para la autorización de una HRS.

Un estudio reciente destaca que las fugas de hidrógeno y fallas estructurales en los sistemas de almacenamiento son los riesgos más críticos. Las HRS manejan un gas con amplio rango de inflamabilidad (4–75 % en aire), baja energía de ignición y alta difusividad, lo que exige medidas de ingeniería más estrictas y distancias de seguridad considerablemente mayores.

Las medidas de seguridad en HRS deben aplicarse desde las fases de diseño e ingeniería, siguiendo metodologías estandarizadas [41]:

1. **Identificación de peligros**, para lo que se utilizan herramientas y metodologías tales como Estudio de Peligros y Operabilidad (Hazard and Operability Study o HAZOP), Modos de Falla y Análisis de Efectos (Failure Modes and Effects Analysis FMEA).
2. **Análisis de consecuencia,** donde se evalúa el nivel de impacto de los peligros identificados como, por ejemplo, sobrepresión, efectos térmicos, fugas u otros.
3. **Análisis de frecuencia,** según el que se estima la ocurrencia de los eventos. Para esto se utilizan herramientas tales como Análisis de Árbol de Falla (Fault Tree Analysys o FTA) o Análisis de Árbol de Eventos (Event Tree Analysis o ETA).
4. **Análisis de riesgos,** correspondiente a la cuantificación y evaluación para determinar el nivel de aceptabilidad respectiva a cada riesgo (de acuerdo con su frecuencia y consecuencia). Esto se realiza mediante herramientas como el Análisis Cuantitativo de Riesgos (Quantitative Risk Analysis o QRA)
5. **Reducción de riesgos,** donde finalmente se aborda los riesgos inaceptables. Asimismo, metodologías integradas como el Process Hydrogen Accident Risk Assessment (PHARA) permiten identificar zonas inflamables, áreas de letalidad y distancias seguras,

facilitando la optimización del diseño de las estaciones con medidas de mitigación adicionales hasta alcanzar un nivel de aceptabilidad adecuado.

Estos procesos iterativos de seguridad en el diseño aplicados por profesionales competentes, sumados al cumplimiento de la normativa, buscan minimizar los riesgos y garantizar la protección tanto a usuarios como a la infraestructura ante eventuales incidentes.

Dentro de estos métodos existen softwares de seguridad general, de gases y/o combustibles y también especializados para hidrógeno, los cuales sirven de herramientas de cálculo. Entre ellos se encuentran: PHAST, FLACS, FLUENT, ANSYS, SimulationX, GeNle, RISKCURVES, AUTODYN, AutoReaGas, ALOHA, HyRAM, SAFETI, WINBUGS, entre otros.

Las medidas de mitigación adoptadas se pueden clasificar en dos categorías:

- **Administrativas:** planes de emergencia y respuesta a accidentes, hojas de seguridad, manuales de operación de la instalación, registros de personal calificado, sistemas de gestión de seguridad y riesgos, protocolos de mantenimiento rigurosos, inspecciones basadas en riesgo y capacitación estandarizada de operadores, entre otros.
- **Físicas:** sensores de presión y temperatura, detectores de hidrógeno, cámaras termográficas, detectores de llama, válvulas de alivio de presión, válvulas de corte automático, sistemas de monitoreo de condiciones anómalas y sistemas de desacople de emergencia (*breakaway*) en mangueras y boquillas, etc. En la **Figura 5** se pueden observar algunos de estos elementos típicos en el diseño de HRS. La fiabilidad de estos elementos resulta determinante para mitigar riesgos asociados a fugas, igniciones y sobrepresurización.

Para ejemplificar los peligros, consecuencias y medidas de mitigación se presenta en la **Tabla 3** los casos de fuga y almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 3 Ejemplos de peligros, consecuencias y medidas de mitigación para HRS

Peligro relacionado	Consecuencia	Medidas de mitigación
Fuga de hidrógeno	Asfixia (por desplazamiento del oxígeno)	1. Limitar el almacenamiento *indoor* de hidrógeno. 2. Detectores de fuga 3. Sistema de ventilación 4. Sistema de apagado con alarma visual y audible 5. Plan de evacuación
	Ignición e incendio	1. Venteo de hidrógeno 2. Equipamiento y materiales no inflamables en el área de posible ignición.
	Explosión	1. Limitar el almacenamiento *indoor* de hidrógeno 2. Protocolo para almacenamiento de hidrógeno (no admisible en espacios confinados sin ventilación)
Almacenamiento de hidrógeno	Sobrepresión sin ignición	1. Sistemas de alivio de presión (válvulas de alivio, discos de ruptura y combinaciones de estas) 2. Plan de evacuación
	Explosión	1. Limitar el almacenamiento *indoor* de hidrógeno 2. Protocolo para almacenamiento de hidrógeno (no admisible en espacios confinados sin ventilación)

Adicionalmente, la **NFPA 2** establece distancias mínimas de seguridad que deben respetarse en el diseño y emplazamiento de las HRS, como se observa en la **Tabla 4**:

Tabla 4 Distancia mínima de seguridad de sistemas de hidrógeno presentes en una HRS con respecto a diferentes grupos de exposición

Sistema	Exposición	Distancia de seguridad (m)
Dispensador	Edificación o límite de terreno de HRS (*lot line*)	3
Hidrógeno gaseoso (15.000 psi)	Puerta/Ventana/Ventilación	10
Hidrógeno gaseoso (15.000 psi)	Vía pública	10
Hidrógeno líquido (100 m^3)	Puerta/Ventana/Ventilación	23
Hidrógeno líquido (100 m^3)	Vía pública	23

Tipos de HRS

Según el método de suministro de hidrógeno, las HRS se clasifican en dos grandes tipos.

a. **Estaciones independientes con suministro externo:**

- **Transporte mediante *tube trailers*:** Se utilizan remolques con tubos de gran capacidad para transportar hidrógeno comprimido a la estación. Una vez descargado, el gas se almacena localmente, se comprime nuevamente si es necesario y se transfiere a cilindros de alta presión para la dispensación. Estos remolques operan normalmente entre 20 y 900 bar, siendo habitual un rango de 200 bar, dependiendo de la regulación local. A mayores presiones, aumentan los costos y el peso del transporte.
- **Transporte por tuberías:** El hidrógeno se transporta a través de tuberías hasta un almacenamiento local de baja presión, desde donde se comprime y se transfiere a los cilindros de alta presión para su dispensado.

b. Estaciones integradas con producción in situ: Estas estaciones generan hidrógeno mediante electrólisis del agua directamente en el sitio, lo almacenan a baja presión y luego lo comprimen para su uso. Aunque ofrecen independencia del suministro externo, presentan costos elevados y mayor complejidad de operación y mantenimiento.

En cuanto a los métodos de dispensado**,** existen dos esquemas principales para lograr la presión requerida.

- **Repostaje en cascada:** Un compresor carga el hidrógeno en tanques de alta presión. El gas fluye hacia el tanque del vehículo mediante la diferencia de presiones entre ambos puntos. Para maximizar la eficiencia, cada tanque de almacenamiento opera con distintos niveles de presión mínima y el llenado se transfiere entre tanques cuando el caudal disminuye (por ejemplo, a 0.1 kg/min). Es habitual usar tres tanques de almacenamiento, mantenidos a presiones diferentes presiones (ejemplo: 900 bar, 700 bar y 500 bar), y enfriar el hidrógeno a -40 °C mediante un preenfriador para evitar sobrecalentamiento del tanque del vehículo durante el repostaje. Este sistema permite usar compresores de menor capacidad y operación continua, pero requiere tanques de alta presión y puede enfrentar limitaciones cuando la demanda de recarga es elevada.
- **Compresor de refuerzo:** Se añade un compresor auxiliar para alcanzar la presión final requerida. El dispensador regula y controla directamente el flujo hacia el tanque del vehículo. Este método implica mayor consumo energético y demanda compresores de mayor potencia, reduciendo la eficiencia general.

- Existen métodos alternativos, como la compresión y almacenamiento de hidrógeno licuado (a -253 °C), pero debido a sus retos técnicos y bajo nivel de madurez a nivel internacional, quedan fuera del alcance de este análisis.

2.2.3 Comparación de tecnologías- estaciones de repostaje

En términos generales, la principal diferencia entre el repostaje BEV y FCEV radica en la disponibilidad de la infraestructura. Mientras que la electricidad está ampliamente distribuida y accesible en la mayoría de las zonas urbanas, el hidrógeno aún requiere ser producido o importado y almacenado previamente, lo que implica mayores costos operativos y logísticos para su implementación a gran escala.

La siguiente tabla resume una comparación de las características clave de cada tipo de estación de servicio:

Tabla 5 Análisis. Comparación de tecnologías de estaciones de respotaje: BEV y FCEV

	Electrolinera	HRS
Disponibilidad	Alta, dada la cobertura de la red eléctrica. Pueden instalarse en centros comerciales, edificios públicos y privados.	Limitada por la necesidad de transportar y almacenar H_2. Difícil de implementar en zonas sin infraestructura de almacenamiento.
Almacenamiento	No requiere almacenamiento intermedio; la electricidad proviene directamente de la red.	Requiere tanques criogénicos para hidrógeno líquido o depósitos presurizados para gas a alta presión (hasta 700 bar), que pueden instalarse subterráneamente.
Reabastecimiento	No requiere; el suministro es continuo desde la red.	Necesita transporte frecuente, usualmente mediante camiones cisterna o tuberías especializadas.
Peligros Asociados	Riesgo de alta tensión, sobretensiones y posibles incendios por recalentamiento.	Riesgo de detonación, fugas o ignición accidental del hidrógeno.
Mitigación de riesgos (Seguridad)	Desconexión automática, monitoreo remoto y sistemas de protección eléctrica.	Válvulas de seguridad, sensores de H_2, ventilación activa, tanques de doble pared y sistemas de detección y corte de emergencia.
Inspecciones	Diarias (opcional): inspección visual. Mensuales: revisión de tensión eléctrica. Certificación: renovable cada 1 a 3 años.	Diarias: revisión visual y de presión. Mensuales: control de sensores y detección de fugas. Certificación: anual.

De esta comparación se desprende que las electrolineras presentan ventajas significativas en términos de disponibilidad, simplicidad operativa y menor complejidad técnica. Su principal desafío radica en la capacidad de carga de la red eléctrica y la infraestructura de carga rápida. Por el contrario, las HRS enfrentan mayores desafíos logísticos y técnicos debido a la necesidad de almacenamiento a alta presión, sistemas de compresión, dispositivos de seguridad adicionales y transporte del combustible.

No obstante, esta misma complejidad abre oportunidades para soluciones innovadoras en zonas rurales, donde la electricidad puede no estar tan disponible o confiable. Por ejemplo, se ha planteado la posibilidad de desarrollar HRS móviles, similares a los camiones cisterna de diésel, que permitan suministrar hidrógeno en áreas remotas, ampliando así la cobertura operativa de los FCEV.

Adicionalmente se tiene que los costos de mantenimiento de las HRS suelen ser mayores, dado el uso de equipos de alta presión, válvulas especializadas y la necesidad de inspecciones regulares para prevenir fugas y degradación de materiales.

Finalmente, cabe mencionar que la estructura de costos de operación de estas estaciones varía según la realidad de cada país, especialmente considerando los impuestos asociados a combustibles fósiles como el diésel. La transición hacia tecnologías limpias puede implicar una reducción de ingresos fiscales por concepto de combustibles tradicionales, lo que influye en la velocidad y el interés con que los gobiernos promueven alternativas como la electromovilidad y el hidrógeno. En este contexto, se espera que el costo del hidrógeno disminuya gradualmente a medida que la industria se desarrolle, dependiendo de políticas públicas como subsidios, incentivos o ajustes impositivos para fomentar su adopción.

2.3 Seguridad

2.3.1 Normativa de seguridad

Como complemento a los análisis técnicos y de infraestructura descritos en capítulos anteriores, resulta fundamental revisar el marco normativo que sustenta la adopción segura y eficiente de tecnologías de electromovilidad basada en hidrógeno. La existencia de normas técnicas específicas para vehículos pesados y HRS es un factor habilitante clave para la implementación de proyectos piloto y su posterior escalamiento comercial. A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos a partir del análisis de bases de datos especializadas de estándares y códigos internacionales.

Tabla 6 Normativa de seguridad para FCEV

Organización / Norma	País / Región	Observaciones Clave
SAE International	EE.UU.	Presencia en sistemas automotrices, seguridad, abastecimiento
ISO	Internacional	Estandarización global (componentes y seguridad)
IEC	Internacional	Normas aplicables principalmente a vehículos industriales
CSA	Canadá	Enfoque técnico en recipientes y sistemas de abastecimiento
GB/T (China)	China	Liderazgo en estándares aplicables a buses y camiones con H_2
Working Party 29 (WP.29)	Global / ONU	Regulación marco para armonización internacional de vehículos
UL	EE.UU.	Foco en vehículos industriales (como montacargas)
EC	Unión Europea	Normativa específica de tipo-aprobación para FCEV
CNS (Taiwán)	Taiwán	Almacenamiento de H_2 en vehículos pequeños

Mediante la revisión de 93 normativas técnicas registradas en la Hydrogen and Fuel Cells Codes and Standards Database, se analizaron regulaciones aplicables a la operación y seguridad de transporte con celdas de combustible, con énfasis en vehículos de carga pesada y de transporte público de pasajeros impulsados por hidrógeno [41].

El conjunto normativo examinado se compone de estándares emitidos por organismos como ISO, SAE, IEC, CSA, UL, así como regulaciones específicas de China, Estados Unidos y la Unión Europea. Cada organización emisora aporta desde distintos enfoques y niveles de aplicabilidad geográfica, cubriendo aspectos críticos para el ciclo de vida de los vehículos: diseño, operación, mantenimiento, seguridad operativa y disposición final.

De las normas revisadas, **64 resultan pertinentes para buses** y **68 para camiones**, excluyendo aquellas dirigidas a sectores no contemplados en este estudio como ferroviario o aeronáutico. Los principales tipos y tópicos de las normas se agrupan de acuerdo a la **Tabla** *7***.**

Tabla 7 Principales tipos de regulación identificados para FCEV

Tipo de Regulación	Ejemplos de Normas Asociadas	Enfoque Principal
Seguridad del vehículo y del sistema	ISO 6469 (1-4), ISO 23273, SAE J2578, GB/T 36288	Seguridad eléctrica, integridad estructural, protección contra fugas y choques
Componentes de combustible	ISO 12619 (Partes 1-16), ISO 19881-19882, SAE J2579	Regulación técnica de válvulas, reguladores, mangueras, líneas, tanques, etc.
Pruebas de rendimiento y consumo	GB/T 35178, ISO 23828, SAE J2572, GB/T 34593	Métodos de medición para consumo, emisiones, autonomía, velocidad máxima
Abastecimiento de hidrógeno	ISO 19885 (2-3), SAE J2601, CSA HGV 5.2	Protocolos de carga (flujo alto, seguridad, comunicación con surtidores)
Terminología y documentación técnica	ISO/TR 8713, SAE J2760, J2574	Uniformidad del lenguaje técnico a nivel internacional
Prácticas para emergencia y reciclaje	SAE J2990/1, SAE J2594	Procedimientos para rescate de vehículos y reciclaje de celdas de combustible
Sistemas eléctricos e híbridos	ISO 6469, SAE J1766	Protección de RESS, seguridad post colisión, funcionamiento eléctrico seguro

Este marco regulatorio evidencia una visión global de estandarización, garantizando la seguridad estructural, la compatibilidad de abastecimiento y la calidad del hidrógeno utilizado.

Por otro lado, se examinaron 66 normativas técnicas vinculadas al diseño, operación y seguridad de las HRS. La revisión incluyó estándares internacionales como ISO, SAE, CSA, NFPA, CGA, OIML, así como marcos normativos de América, Asia y Europa. Los principales estándares identificados se presentan en la **Tabla** 8.

Tabla 8 Normativa de seguridad para HRS

Organización / Norma	País / Región	Observaciones Clave
ISO	Internacional	Amplia estandarización técnica global para diseño y operación de HRS
SAE	EE.UU.	Foco en protocolos de carga para vehículos livianos, buses y camiones
CSA	Canadá	Desarrollo técnico en componentes de estaciones y sistemas de abastecimiento
NFPA / CGA	EE.UU.	Normas orientadas a seguridad contra incendios y fugas en instalaciones de H2
GB/T – GB/Z	China	Conjunto normativo robusto aplicable a estaciones móviles y fijas
OIML	Internacional	Enfoque en sistemas de medición y dispensación de hidrógeno
EC / EUROCEA	Unión Europea	Regulaciones para estaciones aeroportuarias y armonización regional

Para efectos de este estudio, se identifican seis ejes normativos principales que estructuran la regulación de HRS, en función de su aplicabilidad técnica y operativa.

Tabla 9 Principales ejes normativos identificados para HRS

Tipo de Regulación	Ejemplos de Normas Asociadas	Enfoque Principal
Diseño y construcción de estaciones	ISO 19880-1, GB 50177, CSA HGV4.9, GB/T 34584	Requisitos generales, ingeniería de planta, compatibilidad con el entorno
Protocolos de carga y compatibilidad	SAE J2601, ISO 17268, SAE J2799, ISO 19885-1	Procedimientos de carga, presiones estándar (35/70 MPa), comunicación vehículo-HRS
Componentes y sistemas de dispensación	CSA HGV4.1, ISO 19880-2 a -6, SAE J2600	Dispensadores, válvulas, compresores, mangueras y fittings
Seguridad operativa y prevención de riesgos	NFPA 2, CSA HGV4.10, CGA H-14, GB/T 31139	Prevención de fugas, sistemas contra incendios, operaciones seguras
Medición y calidad del hidrógeno	ISO 19880-8, OIML R 139, Handbook 130	Pureza del hidrógeno, sistemas de medición y normativas de venta minorista
Permisos y regulación administrativa	Hydrogen Permitting Guidebook, H3835, Michigan Code	Licencias de operación, requisitos legales para venta y funcionamiento comercial

El análisis evidencia que la serie ISO 19880 y SAE J2601 se consolidan como referencias para garantizar seguridad, eficiencia e interoperabilidad en proyectos globales de infraestructura de hidrógeno.

La revisión de normativas demuestra que existe una base técnica robusta y armonizada a nivel internacional para respaldar el desarrollo de la electromovilidad basada en hidrógeno, tanto en FCEV como en HRS. Para los países de la región, la adopción y adaptación de estos marcos normativos es una condición habilitante esencial para garantizar la seguridad, la eficiencia operativa y la atracción de inversión, fomentando así la expansión sostenible de la cadena de valor del hidrógeno.

2.3.2 Consideraciones prácticas de seguridad en vehículos e infraestructura

Además del marco normativo internacional, resulta fundamental identificar los riesgos específicos que presentan las tecnologías de electromovilidad en su operación práctica. Las tecnologías BEV y FCEV comparten ciertos elementos de seguridad con los de combustión interna — armadura estructural, zonas de deformación, sistemas de retención pasiva como airbags, cinturones de seguridad y anclajes ISOFIX, y sistemas electrónicos de asistencia como control de estabilidad, freno antibloqueo, asistencia al frenado—, pero difieren en función de su sistema de propulsión.

En **BEV,** a energía se almacena en baterías de alto voltaje que, si se dañan o fallan, pueden liberar grandes cantidades de energía eléctrica y térmica. Esto introduce riesgos como electrocución, cortocircuito y fuga térmica (*thermal runaway*). Para mitigarlos, los fabricantes incorporan sistemas de desconexión rápida (*pyrofuses*), gestión térmica activa, blindaje estructural contra impactos y monitoreo continuo de voltaje, corriente y temperatura.

En **FCEV**, La energía se genera a bordo a partir de hidrógeno comprimido (hasta 700 bar), lo que plantea riesgos diferentes. El hidrógeno es altamente difusivo y puede atravesar microfisuras o conexiones, formando mezclas inflamables en segundos. La seguridad depende del uso de tanques compuestos multicapa (tipo IV), sensores de hidrógeno en puntos críticos, válvulas de cierre automático y sistemas de ventilación controlada. [42]

Las **infraestructuras de recargas** también presentan distintos riesgos asociados. Las HRS integran componentes críticos como compresores, tanques de almacenamiento a diferentes presiones, válvulas de alivio, detectores de fuga y sistemas de ventilación. El hidrógeno, por su amplio rango de inflamabilidad (4–75 % en aire), baja energía mínima de ignición y alta difusividad, exige medidas de ingeniería estrictas y distancias de seguridad considerables. En contraste, las estaciones de carga BEV

están compuestas principalmente por transformadores, rectificadores y conectores, con un perfil de riesgo dominado por peligros eléctricos y térmicos localizados.

Respecto a las metodologías integradas de análisis de riesgo, como el *Process Hydrogen Accident Risk Assessment* (PHARA), permiten identificar peligros críticos, estimar áreas de inflamabilidad y establecer distancias seguras. De acuerdo con la NFPA 2, por ejemplo, los dispensadores de hidrógeno deben ubicarse al menos a 3 m de edificaciones y 10 m de ventilaciones o vías públicas, aumentando a 23 m en el caso de hidrógeno líquido en grandes volúmenes.

En síntesis, los BEV presentan principalmente riesgos eléctricos y térmicos, mientras que los FCEV y las HRS implican riesgos asociados al manejo de un gas inflamable a alta presión. Ambos requieren un enfoque sistemático de gestión de riesgos, pero la experiencia internacional muestra que, con diseño adecuado, normas claras y mantenimiento riguroso, estas tecnologías pueden operar en condiciones de seguridad comparables a las de los sistemas convencionales de combustibles fósiles.

2.4 Huella de carbono

El desarrollo de la electromovilidad en el mundo es dinámico. En términos de la huella de carbono de las tecnologías de BEV y FCEV, gran parte de los componentes son similares, pero presentan pequeñas diferencias, incluyendo chasis, motor eléctrico, sistema de frenos, sistema de ejes, computadora (sistema de control interior) y luces. Actualmente, el principal componente diferenciador es el tren motriz. En los BEV corresponde a la batería, normalmente de litio; mientras que en los FCEV corresponde a la celda de combustible con tecnología PEM, además de la batería de soporte y el estanque de hidrógeno comprimido.

Los factores de emisión que se muestran a continuación corresponden a valores promedio y se utilizan como referencia. Para obtener resultados más precisos, es necesario realizar estudios específicos para cada caso.

- El factor de emisión de la fabricación de **baterías de litio** se estima en 73 kg CO_2/kWh. Los materiales activos de la celda contribuyen con 38,4 kg CO_2/kWh, considerando la etapa de extracción, conversión y refinado del polvo de cátodo (compuesto de níquel, manganeso, cobalto y litio), grafito, cobre y electrolito. Otro material que contribuye a la huella es el aluminio de la estructura donde se montan las celdas, con un valor de 12,4 kg CO_2/kWh. Otros componentes, como plásticos y partes electrónicas, aportan alrededor de 8,2 kg CO_2/kWh. La producción de la celda, especialmente en las etapas de secado y calentamiento, requiere un elevado consumo energético. Actualmente, la manufactura de baterías se concentra en China, cuya matriz energética depende en un 60% del carbón, lo que incrementa la huella en aproximadamente 14 kg CO_2/kWh [43].
- El factor de emisión de la fabricación de una **celda de combustible** PEM es de 24,2 kg CO_2e/kW [44]. Las principales fuentes de emisiones provienen de la producción de materiales (por ejemplo, fibra de carbono para placas, catalizador de platino para la MEA, carcasas de acero inoxidable) y del consumo energético en los procesos de manufactura.
- En el caso de los **estanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido** tipo IV, el factor de emisión se estima en 114 kg CO_2/kg H_2 almacenado [45]. La fabricación de estos tanques es altamente intensiva en energía, en particular durante la producción de fibra de carbono. Otros procesos relevantes son el curado con resina, el mecanizado de válvulas y accesorios metálicos, y la fabricación del forro interior (de aluminio o polímero), que luego se recubre con polímero reforzado con fibra de carbono.
- En cuanto a las estaciones de carga, el consumo de electricidad adicional para el BEV se estima en un 10% (pérdidas), mientras que para el FCEV corresponde a 4,93 kWh/kg H_2 por acondicionamiento del energético [46].

A continuación, se presenta un ejemplo simplificado de cálculo de huella de carbono para dos camiones de potencia similar:

BEV: motor 360 kW, batería 282 kWh, modelo Maxus ET-2549, autonomía 150 km [47].
FCEV: motor 350 kW, celda de combustible 180 kW con batería de 72 kWh y siete estanques tipo IV de H_2 (capacidad total 31 kg), modelo Hyundai XCIENT Fuel Cell, autonomía 400 km [14].

Utilizando estos factores, la huella de carbono de la fabricación del tren motriz de BEV y FCEV corresponde a 20,6 y 13,2 t CO_2e, respectivamente. Para el BEV solo se considera la batería, mientras que para el FCEV la huella se compone de un 33% de la celda PEM, 40% de la batería y 27% del estanque.

En la fase de operación se consideran el consumo de combustible y el de la estación de carga. En el BEV, el uso de electricidad directa por el vehículo, según la autonomía de los modelos seleccionados, es de 1,88 kWh/km, mientras que en el FCEV es de 0,0775 kg H_2/km, con un consumo energético asociado de 61 kWh/kg H_2 [48]. Por lo tanto, el consumo energético total en operación asciende a 2,1 kWh/km para el BEV y a 5,1 kWh/km para el FCEV.

Para comparar los valores de fabricación y uso, se supone una vida útil de 1.000.000 km y al menos un reemplazo de batería para el BEV.

Con electricidad renovable (factor de emisión promedio de 25,95 g CO_2e/kWh), la huella de carbono total del BEV y del FCEV corresponde a 94,86 y 145,79 t CO_2e, respectivamente. Considerando un escenario de transición energética, se evalúa también el uso de electricidad proveniente de una matriz energética mixta en la estación de servicio (referencia: China, con un factor de 0,635 kg CO_2/kWh). En este caso, la huella de carbono asciende a 1 354 t CO_2e para el BEV y 378,5 t CO_2e para el FCEV.

El análisis indica que, bajo este escenario simplificado, el impacto de ambas tecnologías depende fuertemente de la fase de operación, en particular de la intensidad de carbono de la electricidad utilizada en la estación de servicio. Con una matriz mixta cuyo factor de emisión supera los 56,2 g CO_2e/kWh, la tecnología BEV presenta menores emisiones que la FCEV. Sin embargo, estos resultados varían según el modelo de cada caso (por ejemplo, el número de reemplazos de batería). Por otro lado, en comparación con la alternativa diésel, cuya huella de carbono varía entre 670 y 1 000 t CO_2e para un millón de kilómetros, un BEV alimentado con electricidad de matriz mixta puede incluso superar a la opción convencional.

2.5 Proyectos de electromovidad a hidrógeno en el mundo

Como se abordó en las secciones anteriores, FCEV se posiciona como una alternativa complementaria a BEV, especialmente para aplicaciones de mayor autonomía y operaciones de transporte pesado. Junto con los aspectos tecnológicos y la infraestructura necesaria para su implementación —particularmente las HRS—, resulta clave analizar cómo esta transición se está materializando en la práctica.

Distintos países han comenzado a desarrollar y validar proyectos piloto y primeras experiencias comerciales, impulsando alianzas público-privadas, instrumentos de financiamiento y pilotos operativos para evaluar la viabilidad técnica y económica de la movilidad basada en hidrógeno.

En el contexto global, se identificaron 53 proyectos vinculados al desarrollo de tecnologías basadas en hidrógeno para el sector transporte [30-34, 41,49-70]. De este total, 33 iniciativas corresponden directamente a FCEV, es decir, aplicaciones donde el hidrógeno es utilizado como vector energético para la propulsión de vehículos mediante celdas de combustible. Estas iniciativas comprenden el despliegue de buses, camiones y, en menor medida, proyectos combinados que abordan ambos tipos de vehículos.

Del total de proyectos de electromovilidad:

- 19 corresponden al desarrollo y operación de camiones de carga impulsados por hidrógeno.
- 11 se centran en buses de transporte público o industrial.
- 3 proyectos abordan ambos tipos de vehículos, como parte de programas piloto o estrategias nacionales más amplias.

- Los 20 proyectos restantes están enfocados en infraestructura de apoyo, particularmente en el despliegue de HRS, tanto públicas como privadas, con distintas configuraciones de presión y capacidades de carga, y en menor medida, en aplicaciones industriales o logísticas complementarias.

Europa lidera el desarrollo de la movilidad a hidrógeno con una cartera diversa de iniciativas que combinan despliegue de vehículos, estaciones de carga e integración industrial. En particular, Alemania y Francia concentran múltiples proyectos activos. Alemania destaca por su enfoque comercial, con actores como ETRUCK, GP JOULE, Hylane y H2 Mobility, que han desplegado flotas de buses y camiones, además de una red nacional de más de 80 estaciones de servicio habilitadas para vehículos ligeros y pesados. Francia impulsa el desarrollo de 20 estaciones verdes a través de Engie y experimenta con aplicaciones logísticas como el proyecto de camiones de reparto de Lidl. El continente también ha desarrollado iniciativas multinacionales, como 3Emotion, que abarca estaciones en Reino Unido, Países Bajos, Dinamarca y Francia, diseñadas para abastecer flotas de buses. Además, proyectos como JIVE-1 y JIVE-2 han desplegado más de 131 buses de pila de combustible en transporte público de Reino Unido, la inversión total del proyecto alcanza los €106 009 000 y con una contribución de la Unión Europea de €32 000 000 [71, 72].

A nivel de vehículos livianos, la iniciativa H2ME (Hydrogen Mobility Europe) constituye un hito clave. En sus dos fases (2015–2023), desplegó más de 1 400 vehículos y 49 estaciones de carga de hidrógeno en 9 países europeos, con un presupuesto de € 62 308 186, contó con contribución de la Unión Europea de €32 000 000 [73]. H2ME ha permitido validar modelos de negocio, probar tecnologías a escala y avanzar en la estandarización de infraestructura. También ha estimulado proyectos complementarios como ZEFER (vehículos de flota cero emisiones) y H2Haul (camiones de carga pesada). Esta plataforma paneuropea ha demostrado la viabilidad técnica y operativa del uso de hidrógeno en taxis, vans comerciales y transporte intensivo. Por ejemplo, París ya cuenta con más de 400 taxis FCEV y una red urbana de 7 estaciones públicas. A nivel nacional, países como Alemania y Dinamarca han establecido redes de carga que, aunque aún subutilizadas, sientan las bases para una expansión futura más eficiente. No obstante, se señala que el éxito a largo plazo dependerá de aumentar la demanda —especialmente en el segmento de vehículos pesados—, de incentivos nacionales y de políticas de apoyo al hidrógeno como opción tecnológica equivalente a otras alternativas cero emisiones.

Asia, especialmente Japón, Corea y China, muestra una estrategia enfocada en desarrollo tecnológico e infraestructura. Japón lidera con buses como el Toyota SORA, múltiples HRS y colaboración con empresas de logística. Corea se centra en camiones y buses, apoyado por una red creciente de estaciones de hidrógeno licuado. China, aunque mencionada brevemente, también impulsa estos desarrollos con apoyo estatal. Asia destaca por integrar su capacidad industrial con movilidad sostenible, proyectándose como exportador de soluciones H2.

Estados Unidos lidera en América del Norte con múltiples proyectos de buses y camiones de hidrógeno, especialmente en California. Hyundai, Toyota y NREL implementan pilotos operativos con enfoque en puertos y corredores logísticos. Se destacan programas como NorCal Zero, Project Portal, ZANZEFF y la red de HRS Trillium. A diferencia de LATAM, EE.UU. ya posee flotas activas y programas de evaluación comparativa con baterías, lo que refleja una etapa más madura en la implementación.

Otras regiones como Sudáfrica, India y Suiza aportan casos singulares pero significativos. Sudáfrica inauguró el primer camión minero a H_2V a nivel mundial. Suiza, en colaboración con Hyundai, proyecta una flota de 1 600 camiones FCEV. India y República Checa están en fases más incipientes, con pilotos mineros y estaciones públicas. Estos ejemplos muestran cómo el hidrógeno empieza a penetrar en sectores estratégicos más allá del transporte urbano.

2.5.1 Modelos de negocios y estrategias de mercado internacional

En cuanto a cómo se configuran los proyectos de electromovilidad con hidrógeno en el mundo, se reconocen distintos modelos de negocio según la interacción de los actores, los cuales se definen de

acuerdo con la propiedad (dueño) de los elementos principales de un proyecto: dueño del vehículo, dueño de la HRS y consumidor/operador del vehículo. Para este análisis, se dejarán de lado los subcomponentes, como el equipamiento de una HRS o los sistemas internos de un vehículo, así como los servicios asociados a la instalación y construcción.

Se define el concepto de modelo de negocio como "la lógica de cómo una organización crea, entrega y captura valor" [74]. Según esta definición, se distinguen los siguientes tipos:

- B2B (Business to Business): Empresas que venden productos o servicios a otras empresas.
- B2C (Business to Consumer): Empresas que venden directamente a consumidores finales.
- B2G (Business to Government): Empresas que venden productos o servicios a entidades gubernamentales.
- C2C (Consumer to Consumer): Personas que venden productos o servicios a otras personas.
- C2B (Consumer to Business): Consumidores que ofrecen productos o servicios a empresas.

Adicionalmente, se reconoce que en proyectos de innovación, pilotos o incluso en casos que involucran distintas áreas de negocio dentro de una misma empresa, pueden existir proyectos orientados a clientes internos. A este tipo se le denominará **B2I (Business to Internal).**

De acuerdo con estos modelos, y considerando el listado de proyectos de electromovilidad con hidrógeno observados, se identifican y caracterizan los siguientes tipos específicos para este sector:

Tabla 10 Modelos de negocio para casos de electromovilidad con hidrógeno

Modelo	Dueño de HRS	Dueño de vehículo	Consumidor / Operador	Ejemplo
(B2C) HRS públicas	Empresa que opera la HRS	Consumidor público o privado	Consumidor público o privado	Estación Air Liquide en Place de l'Alma alimentando Toyota Mirai en París 2024 [75]
(B2C) Venta de FCEV a consumidores directos	–	Empresa automotriz	Consumidor final (público o privado)	Toyota Mirai vendido directamente a particulares en California [76]
(B2G) Alquiler y operación de vehículos para transporte público	Empresa privada o concesionaria	Empresa privada o concesionaria	Entidad gubernamental (ej. operador de transporte público)	Buses a hidrógeno operados por Transdev para la ciudad de Pau (Francia) [77]
(B2B) Alquiler de FCEV para flota privada	Empresa proveedora (puede o no incluir HRS)	Empresa proveedora	Empresa cliente (flota corporativa privada)	Alquiler de camiones de hidrógeno para logística en Reino Unido [78]
(B2B) HRS para carga de flota privada	Empresa proveedora de HRS	Empresa cliente (flota privada)	Empresa cliente (opera sus propios vehículos)	HRS privada de Air Liquide para flota de camiones de empresas Carrefour, Coca-cola, Monoprix [79]
(B2I) Proyecto o piloto de movilidad	Empresa dueña del proyecto	Empresa dueña del proyecto	Empresa dueña del proyecto (usuarios internos)	Proyecto piloto de camión a hidrógeno de Anglo American

interna de una empresa				en mina Mogalakwena (Sudáfrica) [80]
(C2C) Servicios de transporte particular con vehículo a hidrógeno	–	Consumidor particular	Consumidor particular (chofer/usuario)	Taxi con Toyota Mirai en Bélgica [81]

Estos modelos de negocio pueden implementarse en cualquier país bajo condiciones adecuadas. Las opciones B2I destacan por su mayor factibilidad, al no requerir articulación entre distintos actores ni la búsqueda de compradores (off-takers). Los casos B2B también resultan viables, ya que dependen únicamente de la relación proveedor–comprador, aunque su competitividad está determinada por los precios de mercado frente a la electromovilidad a baterías y otras alternativas tradicionales. En contraste, los modelos B2C, B2G y C2C suelen ser más sensibles a los costos, pero encuentran mayor viabilidad en países con incentivos gubernamentales y fondos públicos.

2.6 Diagnóstico tecnológico y normativo internacional

El análisis internacional evidencia un avance sostenido en la movilidad a hidrógeno, que ha pasado de una fase experimental a una etapa de validación técnica y precomercial, particularmente en segmentos donde la electromovilidad a baterías enfrenta limitaciones estructurales. Esta tecnología se ha posicionado como una alternativa complementaria a los BEV, mostrando ventajas claras en aplicaciones de alta exigencia energética, como el transporte pesado de larga distancia, la logística intensiva, el transporte minero y el transporte público urbano de alta demanda. En estos contextos, el hidrógeno ofrece soluciones técnicas viables allí donde los BEV presentan restricciones operativas, especialmente en autonomía, tiempos de recarga y capacidad de carga útil.

Los FCEV destacan por ofrecer autonomías que en algunos casos superan los 600 kilómetros, tiempos de recarga comparables al repostaje de combustibles líquidos y un desempeño más estable en condiciones climáticas adversas. Frente a ellos, los BEV enfrentan desafíos cuando se requiere alta disponibilidad operativa, trayectos largos o recarga rápida en infraestructura limitada. El mayor peso de las baterías en vehículos pesados, sumado al mayor tiempo de recarga y la pérdida de autonomía en climas fríos, limita su competitividad en ciertos usos. En consecuencia, las dos tecnologías no se disputan un mismo nicho, sino que se complementan: los BEV se han consolidado en el transporte liviano urbano y de corta distancia, mientras que los FCEV emergen como una opción más robusta para operaciones industriales, logísticas y de transporte intensivo.

A nivel internacional, la movilidad a hidrógeno ha demostrado avances a través de proyectos que combinan despliegue de vehículos y desarrollo de infraestructura. En Europa, se observa una estrategia estructurada que articula demostración tecnológica, marcos normativos y esquemas de financiamiento público, con una red creciente de estaciones y flotas activas en distintos países. Asia, por su parte, ha enfocado sus esfuerzos en el desarrollo tecnológico y la integración con cadenas industriales nacionales, consolidando su capacidad productiva y operativa, especialmente en el transporte público y de carga. En América del Norte, se destaca el enfoque en transporte pesado, con pilotos operativos vinculados a corredores logísticos, aunque con marcos regulatorios aún en evolución. Otras regiones, como África, Europa del Este y América Latina, han comenzado a desarrollar pilotos en sectores específicos, explorando el potencial del hidrógeno en contextos industriales o de difícil electrificación. En todos los casos, la infraestructura de repostaje representa uno de los principales desafíos: si bien ha evolucionado hacia estaciones con presiones duales y producción local mediante electrólisis, los altos costos de instalación y el bajo nivel de utilización inicial dificultan su sostenibilidad. El escalamiento de esta infraestructura dependerá de la demanda, la coordinación intersectorial y el diseño de políticas que favorezcan su implementación eficiente.

Finalmente, los marcos normativos muestran un desarrollo desigual. Europa cuenta con estándares avanzados de homologación, seguridad y operación, mientras que otras regiones aún carecen de

regulaciones específicas o de criterios técnicos comunes. La existencia de instancias multilaterales, como aquellas dirigidas por la unión europea, ha sido clave para transferir conocimiento y facilitar procesos de estandarización. En todos los casos, se reconoce que la consolidación del hidrógeno en movilidad requiere de políticas activas, subsidios iniciales y una visión de largo plazo que combine demanda, infraestructura y capacidades industriales.

3. Diagnóstico Latam: foco Red de Aprendizaje

3.1 Análisis de estudios por país y experiencias internacionales

Con el fin de comprender el grado de avance y los principales focos de interés en relación con la electromovilidad basada en hidrógeno en América Latina, se revisaron 25 estudios desarrollados en los países que integran la Red RH2 [82-107]. Esta revisión permite identificar los temas más abordados, los sectores priorizados, las barreras más comunes y las iniciativas institucionales en curso. Además, se identifica a Uruguay, Costa Rica y Chile dentro de los países de red como los representantes de los estudios de electromovilidad propulsada a hidrógeno, como se muestra en el gráfico de la **Figura 8**. A través de esta recopilación se busca establecer un panorama comparativo entre países, reconociendo diferencias en el nivel de desarrollo, profundidad técnica y orientación estratégica de los estudios disponibles. Las subsecciones siguientes presentan un resumen de los hallazgos documentales por país.

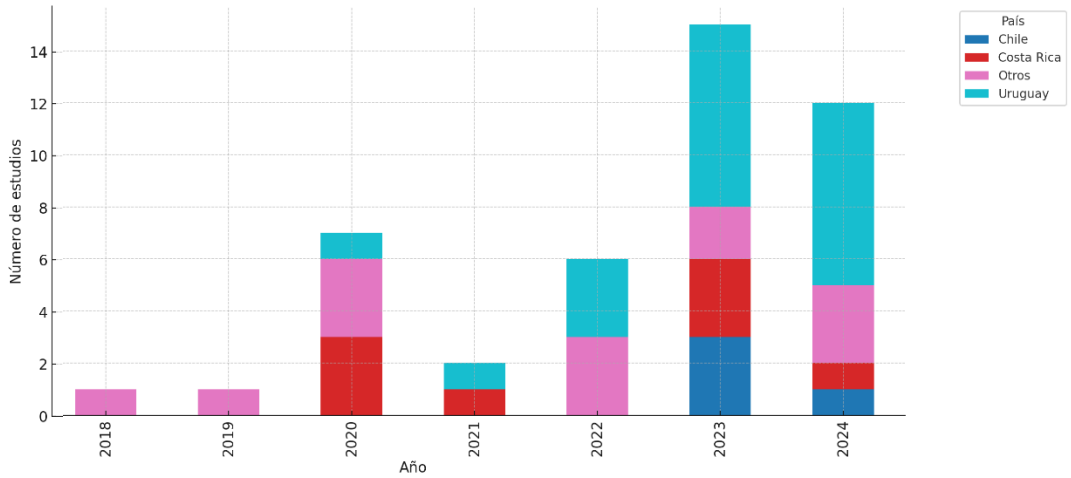

Figura 8 Evolución de la cantidad de estudios de electromovilidad basada en hidrógeno con foco países Red RH2

En **Argentina**, no se identificaron estudios específicos incluidos en la tabla analizada, por lo que no se dispone de información detallada sobre iniciativas o investigaciones relacionadas con la electromovilidad o el uso de hidrógeno en el transporte, al menos dentro del conjunto documental considerado.

En **Chile,** los estudios se han enfocado principalmente en el análisis del potencial del hidrógeno verde como alternativa energética para el transporte ferroviario y de carga pesada. Uno de los documentos plantea el desarrollo de una red de trenes impulsados por hidrógeno entre Valparaíso y Santiago, aunque advierte sobre las dificultades logísticas y de inversión asociadas a este tipo de proyectos. También se incluye un análisis normativo que compara regulaciones nacionales e internacionales aplicables al uso de hidrógeno en trenes y camiones, así como un reporte que detalla los pasos necesarios para implementar un proyecto piloto de camiones a hidrógeno, con actividades orientadas a preparar un llamado a concurso para su ejecución. Estos estudios reflejan un interés institucional por explorar el rol del hidrógeno en la descarbonización del transporte, aunque también subrayan los desafíos técnicos, normativos y financieros que aún persisten en el país.

En **Colombia**, al igual que en Argentina, no se identificaron estudios específicos dentro del conjunto documental revisado, por lo que no se cuenta con información detallada sobre esta temática para el país.

Costa Rica presenta un conjunto de estudios enfocados tanto en la electromovilidad como en el desarrollo del hidrógeno verde. Entre los temas abordados se encuentran: análisis del ciclo de vida ambiental de BEV y FCEV; evaluación del costo total de propiedad de distintas tecnologías vehiculares; y requerimientos de infraestructura para puntos de carga de hidrógeno. También se analizan proyecciones macroeconómicas relacionadas con el hidrógeno verde, incluyendo posibles exportaciones hacia Europa y Asia, así como estimaciones de beneficios económicos y ambientales. Algunos estudios destacan el rol del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y revisan políticas públicas aplicadas entre 2018 y 2022, incluyendo barreras e incentivos para la adopción del hidrógeno en el transporte público. Finalmente, un reporte de la Asociación de Movilidad Eléctrica de Costa Rica incluye datos actualizados sobre puntos de carga y registros de vehículos eléctricos, lo que permite una caracterización cuantitativa del progreso del país en esta área.

En el caso de **México**, no se identificaron estudios incluidos en la tabla analizada, por lo que no se dispone de información específica sobre electromovilidad o hidrógeno verde para este país en el marco de este análisis.

Uruguay presenta una amplia producción de estudios e informes tanto sobre electromovilidad como sobre el desarrollo del hidrógeno verde. En el ámbito de la electromovilidad, destacan iniciativas como el proyecto MOVÉS, la Guía sobre Movilidad Urbana Eléctrica, y programas de subsidios e incentivos fiscales para la adopción de BEV, entre ellos el programa Subite y los instrumentos promovidos por el Ministerio de Industria, Energía y Minería. También se documentan avances en infraestructura de carga, regulación y proyectos piloto relacionados con el transporte público eléctrico. En cuanto al hidrógeno verde, Uruguay ha elaborado una hoja de ruta nacional, ha impulsado programas como H2U y ha desarrollado estudios sobre factores habilitantes, proyecciones de producción, empleo y potencial de exportación. Se destacan iniciativas concretas como el proyecto H24U para camiones FCEV, estudios de viabilidad para trenes a hidrógeno en el área metropolitana de Montevideo, y un memorando de entendimiento para la instalación de una planta de hidrógeno en Paysandú. Además, se incluyen trabajos técnicos y académicos que profundizan en aspectos regulatorios, económicos y ambientales del uso del hidrógeno en el transporte y otros sectores productivos. La amplitud y profundidad de estos estudios posicionan a Uruguay como uno de los países más activos de la región en esta materia.

Respecto a otras regiones fuera del foco principal del estudio, se incluyen casos de Europa, Estados Unidos, Reino Unido, Noruega, Italia, así como documentos de enfoque general o global. Entre los temas abordados se encuentran: la competitividad económica de buses y camiones impulsados por hidrógeno; estudios de caso sobre despliegue de flotas en contextos reales; barreras técnicas y no técnicas para la adopción de estas tecnologías; y análisis normativos comparativos. En Estados Unidos, se han documentado evaluaciones de buses con celdas de combustible, pruebas piloto con camiones en zonas portuarias, y estudios sobre eficiencia en flotas públicas. En Europa y el Reino Unido, destacan iniciativas como el programa JIVE y revisiones sistemáticas sobre costos y desempeño del transporte con hidrógeno. También se incluyen estudios comparativos que evalúan distintas tecnologías de cero emisiones para el transporte de carga pesada, considerando escenarios de adopción futura. Estos documentos permiten contrastar experiencias en contextos más avanzados tecnológicamente y ofrecen aprendizajes valiosos para el diseño de estrategias en América Latina.

3.2 Planificación estratégica en los países de la Red RH2

La planificación estratégica es un componente clave para el desarrollo del mercado de la electromovilidad impulsada por hidrógeno renovable, ya que permite establecer un marco de referencia para orientar las inversiones, definir estándares técnicos y coordinar los esfuerzos del sector público y privado. Esta planificación se expresa principalmente a través de instrumentos de política pública específicos, como hojas de ruta, estrategias nacionales y planes de acción.

En la **Tabla 8** se presentan los instrumentos de política pública identificados en los países que integran la Red RH2. Se destaca el caso de Chile, que lidera en número y alcance de documentos publicados,

mientras que México aún no cuenta con una hoja de ruta oficial sobre hidrógeno, existen iniciativas relacionadas desde el sector privado.

Tabla 11 Instrumentos de política pública para incentivo del mercado del H_2 en países de la Red RH2

País	Instrumento
Argentina	Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno
Chile	• Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde • Plan de Acción 2023-2030 de Hidrógeno Verde • Plan de Trabajo de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024 – 2030
Colombia	Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia
Costa Rica	Estrategia Nacional de H2 Verde de Costa Rica
México	No hay documentos oficiales de Hojas de Ruta de Hidrógeno
Uruguay	Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía de Hidrógeno

Dentro de los instrumentos listados en la **Tabla 8**, se encuentran diversas referencias a ejercicios de fomento para el mercado de la electromovilidad con hidrógeno, los que detallan a continuación.

Argentina

Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno: Entre las acciones necesarias para fortalecer el mercado interno, se contempla el desarrollo de proyectos demostrativos que incluyan el uso de hidrógeno de bajas emisiones en procesos industriales y en el transporte. No obstante, el documento no establece plazos ni lineamientos concretos para su implementación.

Chile

- **Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde:** Durante la primera fase, hasta 2025, se promueve el uso doméstico de hidrógeno en aplicaciones con demanda establecida, como buses de transporte público y camiones de larga distancia. En las fases siguientes, se proyecta la expansión hacia nuevos tipos de vehículos y mayores volúmenes.
- **Plan de Acción 2023–2030 de Hidrógeno Verde:** La Acción 56 contempla la implementación de un proyecto piloto con un bus a hidrógeno en el transporte público. Este piloto tiene por objetivo evaluar técnica, económica y socialmente el despliegue de esta tecnología, y se prevé su ejecución entre 2024 y 2025. Las acciones incluyen la adquisición del vehículo, su operación y la evaluación correspondiente. La iniciativa está liderada por el Ministerio de Energía en conjunto con el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y la Dirección de Transporte Público Metropolitano, con el apoyo del proyecto RH2 de GIZ.
- **Plan de Trabajo de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024–2030:** Este documento fue elaborado mediante un proceso interministerial, con participación de los Ministerios de Energía, Economía, Fomento y Turismo, Transportes y Telecomunicaciones, Minería y Salud. A continuación, se destacan los puntos vinculados a la electromovilidad:

  - (Ministerio de Energía): Desarrollo de normas técnicas de calidad del hidrógeno y procedimientos de control según el uso final, incluyendo transporte.
  - (Ministerio de Energía): Modificación del DS 132/79 del Ministerio de Minería, para incorporar aspectos relacionados con la comercialización del hidrógeno.
  - (Ministerio de Energía): Regulación para estaciones de dispensado de hidrógeno, incluyendo definiciones técnicas y de seguridad para su implementación.

- (Ministerio de Energía): Regulación para estaciones públicas multicombustible, que deberán garantizar la compatibilidad y seguridad del dispensado de hidrógeno junto con otros combustibles.
- (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones): Regulación para el certificado de homologación de vehículos nuevos, incorporando criterios técnicos internacionales para FCEV.
- (Ministerio de Salud): Modificación al DS 43/15 sobre almacenamiento de sustancias peligrosas, incluyendo condiciones específicas para el hidrógeno y derivados como amoníaco y combustibles sintéticos.

Colombia
Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia: Se plantea el uso del hidrógeno como sustituto de combustibles fósiles en el transporte. Se proyecta el inicio de la demanda en 2026, enfocándose en aplicaciones como buses y camiones. Para 2050, se estima que el 64 % del hidrógeno producido en el país será consumido internamente, en buena parte por el sector transporte.

Costa Rica
Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Costa Rica: El documento define como eje prioritario la descarbonización del transporte y la industria. Para el año 2030, se espera contar con una flota de entre 100 y 250 vehículos livianos, y entre 200 y 600 vehículos pesados a hidrógeno, así como entre 15 y 20 HRS públicas.

México
Actualmente, **México no cuenta con una hoja de ruta** oficial para el desarrollo del hidrógeno. Sin embargo, existen iniciativas del sector privado, como el documento “Hidrógeno Verde: El vector energético para descarbonizar la economía de México”, publicado por la Asociación Mexicana de Hidrógeno (H2 México). Este informe propone metas, identifica barreras y oportunidades, y presenta una hoja de ruta estructurada en cuatro etapas: recopilación de antecedentes, evaluación del potencial, análisis de impacto (económico, social y ambiental) y definición de metas de implementación.

Uruguay
Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Uruguay: Plantea aplicaciones para el transporte en dos fases. En la Fase 1 (2022–2025), se implementarán entre uno y dos proyectos piloto en sectores como camiones pesados, buses de larga distancia o vehículos agrícolas. A partir de 2025, se proyecta el inicio de la comercialización de camiones, dando paso a la Fase 2, en la que se ampliarán las aplicaciones a otros sectores como el transporte marítimo, la producción de fertilizantes y usos industriales.

3.3 Normativa nacional sobre vehículos e infraestructura de hidrógeno

Si bien la mayoría de los marcos normativos internacionales en materia de electromovilidad con hidrógeno provienen de organismos como ISO, SAE o IEC, su implementación práctica depende de la adaptación que cada país realice en su propio sistema regulatorio. En los países de la Red RH2, la homologación de FCEV y la autorización de HRS presentan distintos grados de avance: algunos han incorporado definiciones específicas o decretos que permiten la validación de proyectos piloto, mientras que otros aún carecen de procedimientos claros y recurren a normativas generales o a la adopción de estándares de referencia internacionales. A continuación, se presenta un análisis por país que muestra cómo estas disposiciones globales se traducen en requisitos concretos a nivel nacional, evidenciando brechas, avances y oportunidades para armonizar la regulación en la región.

Argentina
Actualmente no existen vías específicas para la homologación de FCEV. Sin embargo, sí las hay para BEV e híbridos, reguladas en el Decreto 196/2025 de Modificación de la Reglamentación General de la Ley N.° 24.449 de Tránsito y Seguridad Vial.
Adicionalmente, el Decreto N.° 779/95 y sus modificatorios establecen que los vehículos homologados bajo certificaciones de organismos reconocidos por Naciones Unidas (TRANS/WP29/343) pueden obtener la Licencia para Configuración de Modelo (LCM). La autoridad competente también puede validar total o parcialmente certificaciones extranjeras, lo que facilitaría la entrada de nuevas tecnologías como

los FCEV. Sin embargo, ante la ausencia de casos explícitos, cada proyecto debe consultar su pertinencia y presentar documentación complementaria según corresponda.
En cuanto a las HRS, no se identifican procedimientos específicos.

Chile
La homologación de vehículos está a cargo del Centro de Control y Certificación Vehicular del MTT (3CV). Si bien no existe una normativa específica para FCEV, sí existen precedentes: el Decreto 145 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones incorpora la definición de "Vehículo Celda de Combustible", lo que ha permitido la homologación de proyectos como el camión Hidrohaul, el bus Reborn y el Toyota Mirai (este último fuera del alcance del presente estudio).
Respecto a las HRS, estas no están contempladas en el Decreto 13 del Ministerio de Energía. Por ello, los proyectos deben presentarse ante la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) mediante la modalidad de Proyecto Especial, aplicando normativas internacionales de referencia.

Colombia
No existe aún un procedimiento específico para la circulación de FCEV ni protocolos claros de evaluación de seguridad. La Ley de Movilidad Eléctrica N.° 1964/2019 clasifica a los FCEV como vehículos eléctricos, por lo que comparten sus criterios de autorización.
En cuanto a HRS, tampoco existe un proceso definido: se aplican las Normas Técnicas Colombianas de Seguridad Operacional vigentes.
El Decreto 1476/2022 establece responsabilidades sectoriales:
Art. 2.2.7.1.8: el Ministerio de Transporte, junto con el Ministerio de Ambiente, deberá definir requisitos, procedimientos e incentivos para el uso de hidrógeno en transporte.
Art. 2.2.7.10: el Ministerio de Minas y Energía regulará la ubicación, diseño, construcción, pruebas y requisitos para infraestructura de suministro de hidrógeno vehicular.

Costa Rica
La Ley para la Promoción e Implementación de una Economía de Hidrógeno Verde otorga la rectoría al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).
En 2018, el MINAE publicó el Plan de acción interinstitucional para propiciar el uso del hidrógeno en el sector transporte, que evaluó la factibilidad de proyectos de movilidad e incluyó el diseño de HRS. Como resultado, el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) creó el Comité Técnico Nacional de Hidrógeno para adaptar normas y estándares internacionales.
Actualmente, no existe un proceso formal de homologación de FCEV.

México
No se identifican normativas específicas para la homologación de FCEV ni permisos concretos para HRS.

Uruguay
No existe homologación específica de FCEV, aunque está en desarrollo el Reglamento Técnico MERCOSUR sobre Vehículos a Hidrógeno y Celdas de Combustible. Este ya pasó por consulta pública y se encuentra en revisión por los grupos de trabajo.
En cuanto a infraestructura, la Resolución 349/024 aprueba el Reglamento de Seguridad de Proyectos de Hidrógeno como Fuente de Energía Secundaria, emitido por la Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua (URSEA). Dicho reglamento establece la documentación requerida e incorpora normas internacionales de referencia para toda la cadena de valor del hidrógeno, incluido el dispensado en HRS.

En síntesis, el panorama regulatorio de la Red RH2 muestra un avance heterogéneo. Países como Chile y Uruguay han dado pasos concretos al establecer procedimientos específicos para la autorización de HRS y reconocer a los FCEV dentro de sus marcos normativos, aunque todavía de manera incipiente. Argentina y Colombia permiten homologaciones apoyadas en certificaciones internacionales o normativas generales, lo que abre oportunidades, pero también deja espacios de incertidumbre para los desarrolladores de proyectos. En contraste, Costa Rica y México carecen de procesos formales, limitándose a lineamientos estratégicos o políticas incipientes. Este escenario evidencia la necesidad de avanzar hacia una mayor armonización regional que facilite la inversión, reduzca la discrecionalidad en la interpretación normativa y brinde seguridad jurídica a los actores privados. El fortalecimiento de las

capacidades regulatorias nacionales, acompañado de lineamientos comunes a nivel regional, será clave para acelerar la implementación de proyectos de movilidad con hidrógeno en Latinoamérica.

3.4 Instrumentos de financiamiento y subsidios disponibles

El despliegue de proyectos de electromovilidad con hidrógeno en América Latina enfrenta no solo desafíos tecnológicos y regulatorios, sino también importantes barreras económicas. La viabilidad de estos proyectos depende en gran medida del acceso a instrumentos de financiamiento y mecanismos de incentivo que permitan reducir el costo inicial de adopción, especialmente en etapas tempranas de desarrollo. En este contexto, en los países de la Red RH2 han comenzado a implementar políticas públicas, fondos concursables y beneficios tributarios que buscan acelerar la introducción de tecnologías cero emisiones en el transporte, tanto público como de carga. Esta sección presenta un análisis comparativo de los principales instrumentos disponibles en cada país, destacando aquellos aplicables específicamente a FCEV, así como a las etapas asociadas a infraestructura, I+D+i y producción local de hidrógeno renovable.

Dado que los FCEV corresponden técnicamente a vehículos eléctricos, los incentivos aplicables a estos últimos suelen ser también válidos para su implementación en los países de la Red RH2. La disponibilidad, plazos y condiciones de estos fondos e incentivos dependen exclusivamente de las entidades que los administran. Se recomienda a los interesados verificar directamente con las instituciones responsables.

Argentina
La Resolución 29/2025 del Ministerio de Economía exime del Derecho de Importación Extrazona (DIE) a vehículos electrificados cuyo valor FOB no supere los 16 000 USD. Esta normativa considera electrificables aquellas tecnologías alternativas a los motores de combustión interna, incluyendo vehículos con motor eléctrico, híbrido o a celda de combustible. El beneficio aplica por cinco años y está limitado a 50 000 cupos anuales.
La Ley 10 949, promulgada en 2022, establece la exención del Impuesto a los Automotores (patente) para BEV e híbridos, tanto livianos como pesados. No obstante, su aplicación varía según la provincia, debido a la estructura federal del país.
La Agencia I+D+i, dependiente de la Secretaría de Ciencia y Tecnología, dispone de tres fondos que pueden apoyar proyectos de electromovilidad con hidrógeno:

- **FONCYT**: investigación científica y tecnológica, básica o aplicada.
- **FONTAR**: mejora tecnológica de empresas, desarrollo de prototipos, infraestructura y capacitación.
- **FONARSEC**: articulación entre sector científico y productivo para proyectos estratégicos.

Chile
Si bien no existen fondos permanentes específicos para movilidad con hidrógeno, diversas líneas de apoyo de **CORFO** y **ANID** son aplicables a las distintas etapas de desarrollo. Algunos ejemplos son:

- **Innova Alta Tecnología (CORFO)**: cofinanciamiento de hasta $1 000 millones CLP para innovación en I+D.
- **Crea y Valida (CORFO)**: hasta $180 millones CLP (proyectos individuales) y $220 millones CLP (proyectos colaborativos).
- **Programa Tecnológico PTEC (CORFO)**: cofinancia hasta 60 % del costo total con tope de $3.500 millones CLP en convocatorias específicas.
- **Facility (CORFO):** Línea de financiamiento canalizada vía bancos, con garantías CORFO, que facilita crédito para inversión productiva o proyectos verdes.
- **Crédito Verde (CORFO):** Créditos con condiciones preferenciales y garantías CORFO para proyectos de eficiencia energética, renovables o economía circular.
- **Ley I+D:** Beneficio tributario que permite descontar hasta 35 % de la inversión en investigación y desarrollo del impuesto de primera categoría.

- **FIC-R:** Fondos regionales concursables para proyectos de innovación y desarrollo productivo con impacto territorial.

Además, existen incentivos regulatorios y tributarios que aplican a la electromovilidad:

- Descuento en el permiso de circulación para vehículos eléctricos (Ley 21.505).
- Depreciación acelerada (Ley de Eficiencia Energética).
- Exención del impuesto verde para buses y camiones eléctricos.
- Exención de restricciones de circulación por emisiones.
- Acceso a infraestructura pública de carga.
- Acuerdo Público-Privado por la Electromovilidad desde 2017 para coordinación intersectorial.



Colombia
El Decreto 895 de 2022 amplía los beneficios de la Ley 1 715 de 2014 para incluir proyectos de hidrógeno. Se contemplan:

- Deducción del 50 % del total de la inversión, aplicable hasta por 15 años.
- Depreciación acelerada de activos en tres años.
- Exclusión del IVA en bienes y servicios relacionados.
- Exención de aranceles para importación de equipos y materiales.

Aunque estos beneficios no aplican directamente al uso de hidrógeno en transporte, sí son relevantes para proyectos que contemplen generación y carga in situ. La certificación de la UPME es un requisito para acceder a ellos.
El Fondo FENOGE promueve el uso eficiente de la energía. Su iniciativa +H2 Colombia financió proyectos alineados con la Hoja de Ruta del Hidrógeno.



Costa Rica
Los BEV y FCEV están exonerados del impuesto a la propiedad por un plazo de cinco años, con exención decreciente desde el 100 % en el primer año hasta el 20 % en el quinto. Además, cuentan con descuentos a permisos de circulación para vehículos eléctricos.
La Promotora Costarricense de Innovación e Investigación, vinculada al MICITT, financia pymes y emprendimientos tecnológicos que podrían incluir proyectos de movilidad con hidrógeno.
El Banco Nacional de Costa Rica lanzó el primer Fondo de Inversión en Electromovilidad para apoyar la transición hacia un transporte público sostenible.
La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde incluye la acción 2.4.4, centrada en identificar fondos internacionales para investigación, desarrollo e innovación, y en difundir sus requisitos. Entre los desafíos identificados se encuentran la falta de alineación entre los fondos disponibles y las prioridades nacionales, así como la baja elegibilidad de proyectos por incumplimiento de requisitos.



México
Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, los vehículos a celda de combustible destinados al transporte público o de carga de última milla son deducibles hasta por un 25 % del valor total del vehículo. Modificaciones a la Ley de Impuestos Generales de Importación y Exportación de 2020, exenta de pagos de arancel a vehículos de categoría eléctrica.
México cuenta con una banca de desarrollo sólida, conformada por instituciones como Banobras, Bancomext y Nafin, que ofrecen financiamiento de largo plazo para infraestructura y energía, incluyendo proyectos de electromovilidad. Los montos, plazos y criterios varían según la entidad y el tipo de proyecto.



Uruguay
La Ley N.º 16 906 de Promoción de Inversiones clasifica a los proyectos de hidrógeno como manufactura de alta tecnología, permitiendo acceder al máximo puntaje en los beneficios fiscales.
Los FCEV están exentos de aranceles de importación, con tasa 0 para transporte de pasajeros o mercancías, según lo estipulado en la Resolución MEF 4889/021. Complementariamente, el Decreto

390/021 de 01/12/2021 modifica las tasas del IMESI (Impuesto específico interno) a 0% para vehículo eléctricos.
En 2022, la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII)**,** junto al MIEM y LATU, lanzó el Fondo Sectorial de Hidrógeno Verde**,** que financia investigación, innovación y formación en hidrógeno, incluyendo su uso en transporte pesado.

Como se observa en los países de la red y también en el panorama internacional, el financiamiento de proyectos de movilidad a hidrógeno combina modelos de negocio y mecanismos de apoyo que varían según la madurez del mercado y el rol del Estado de cada país.

Existen ejemplos aplicables directamente de la electromovilidad, como **en Chile**, la experiencia de cofinanciamiento con usuarios de Mi taxi eléctrico [108] en un esquema C2C subsidiado o la flota RED de buses eléctricos [109] que configuró un esquema B2G basado en leasing con garantías públicas, modelo que podría adaptarse a buses y camiones a hidrógeno. Este enfoque puede complementarse con los instrumentos de financiamiento vistos de cada país, según lo que se observa que en **Argentina**, los fondos de I+D (FONCYT, FONTAR y FONARSEC) habilitan pilotos B2I y alianzas B2B; en **Chile**, los instrumentos de CORFO y la Aceleradora H2V cofinancian proyectos de innovación, pilotos estratégicos y desarrollo de infraestructura, viabilizando esquemas B2I, B2B y B2G en transporte público y de carga; en **Colombia**, los incentivos tributarios y el Fondo FENOGE facilitan esquemas B2B para generación y carga in situ; en **Costa Rica**, las exenciones impositivas y el Fondo de Inversión en Electromovilidad apoyan proyectos B2C y B2G; en **México**, los incentivos fiscales y la banca de desarrollo permiten viabilizar modelos B2B, B2G y B2I; y en **Uruguay**, los beneficios fiscales y exenciones arancelarias favorecen proyectos B2B en transporte pesado.

En el plano internacional, destacan experiencias como HysetCo [110] en París que realiza arriendo de vehículos o flotas de manera integrada, ofreciendo servicios completos, incluyendo vehículos, suministro, operación y soporte técnico a empresas y particulares (B2C/B2B integrado) y cuenta con financiamiento de capital de riesgo gestionando actualmente una red de 8 estaciones y una flota de más de 700 vehículos. Otro ejemplo son los camiones Hyundai XCIENT en Suiza [111] bajo un esquema B2B, H2-as-a-service donde las empresas usuarias (por ejemplo, transportistas, mineras o operadores logísticos) no compran los camiones FCEV ni la infraestructura de carga, sino que pagan por kilómetro recorrido, por kilogramo de hidrógeno consumido o por servicio de carga. También se tiene ejemplos de subsidios en países como Japón [112] y EE. UU. [113], que han impulsado proyectos B2C y B2G asegurando precios competitivos y expansión de infraestructura.

Finalmente, de este análisis, se plantean opciones viables para la región:

- **Leasing con respaldo público (B2G):** inspirado en el modelo RED de electromovilidad de buses en Santiago de Chile, con contratos de largo plazo de leasing garantizados por el Estado que permiten atraer inversión privada en buses o camiones a hidrógeno. Se destaca la alternativa C2C subvencionada de taxis como una alternativa similar más costo intensiva que podría ser más viable para el largo plazo.
- **Fondos nacionales como catalizadores (B2I/B2B):** instrumentos como CORFO, FONCYT, FONTAR, FONARSEC, ANII, FENOGE o la banca de desarrollo pueden cofinanciar pilotos internos o alianzas proveedor–cliente, reduciendo barreras de entrada para infraestructura y redes de dispensadores.
- **H2-as-a-service (B2B):** probado en Suiza con Hyundai, basado en pago por km o por kg de hidrógeno, traslada el CAPEX al proveedor y entrega certidumbre al usuario, pudiendo complementarse con subsidios iniciales o incentivos a la producción como fue el Acto de reducción de la inflación (Inflation Reduction Act o IRA) en EE. UU [114].
- **Incentivos tributarios y exenciones (B2C/B2G):** regímenes de países como Argentina, Uruguay y Costa Rica reducen aranceles e impuestos, favoreciendo proyectos de transporte público y de transportes particulares a hidrógeno, por ejemplo, taxis.

- **Modelos integrados (B2C/B2B):** experiencias como HysetCo en París muestran cómo vincular estaciones con flotas de taxis o buses asegura demanda inicial y mejora la rentabilidad de la infraestructura.

Si bien los países de la Red RH2 han dado pasos hacia la habilitación del acceso a financiamiento y reducir las barreras económicas para la adopción de movilidad impulsada por hidrógeno, persisten otro tipo de desafíos. Entre ellos se encuentran la fragmentación institucional, la falta de continuidad en los instrumentos disponibles y la limitada articulación entre el sector público, la banca y los actores tecnológicos. Para avanzar hacia una implementación efectiva y sostenida, es clave fortalecer los marcos de financiamiento con una visión estratégica de largo plazo, que considere no solo la incorporación de vehículos, sino también el desarrollo de capacidades locales, infraestructura y producción nacional de hidrógeno renovable. Algunas formas de implementar esto es mediante hojas de ruta, leyes (como por ejemplo la ley de eficiencia energética en Chile [115]) u otros instrumentos de planificación estratégica de largo plazo que permita guiar y regular la transición con estándares o incentivos para FCEV, o en su defecto, penalidades para las alternativas tradicionales no sustentables.

3.5 Disponibilidad de hidrógeno en países de la RedH2R

La disponibilidad de hidrógeno renovable en América Latina depende tanto de las proyecciones nacionales incluidas en las hojas de ruta como de los proyectos en desarrollo en cada país. A continuación, se presenta un análisis por país, considerando tanto metas y proyecciones oficiales como las iniciativas privadas y su grado de consolidación.



Argentina

En la Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno se establecen metas claras de producción hacia 2030 y 2050. Para 2030 se proyecta una generación de 0,3 Mt de hidrógeno a partir de electrólisis del agua, de los cuales 0,28 Mt se destinarían a exportaciones y 0,02 Mt al consumo interno. Hacia 2050, la producción neta alcanzaría los 5 Mt, con 4 Mt dedicados a exportación y 1 Mt al mercado local, requiriéndose 30 GW de electrolizadores y 55 GW de energías renovables para alcanzar esas metas. Se observa además un crecimiento sostenido del consumo interno, cuya fracción aumenta en cada año proyectado. En cuanto a proyectos, se estima que existen al menos veinte iniciativas en desarrollo, aunque no se dispone de información consolidada sobre la capacidad instalada total, lo que limita una cuantificación precisa de la oferta potencial [116].



Chile

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde proyecta un crecimiento de la industria de dimensiones comparables al sector minero en 2050. El tamaño estimado de mercado para exportaciones alcanzaría los 2,5 BUSD en 2030 y 24 BUSD en 2050, mientras que el mercado doméstico crecería de 2 BUSD en 2030 a 9 BUSD en 2050. Estas estimaciones se basan en un potencial de producción de 160 Mt/año de hidrógeno generado mediante electrólisis. En paralelo, Chile concentra la mayor cartera de proyectos en la región, con 103 iniciativas anunciadas que totalizan 39 GW de electrólisis, lo que confirma su posición como polo principal en la industria latinoamericana [117].



Colombia

La Hoja de Ruta del Hidrógeno plantea una meta de producción de hidrógeno bajo en emisiones hacia 2030, diferenciando entre hidrógeno verde y azul. En el caso del primero, se proyecta instalar entre 1 y 3 GW de capacidad de electrólisis, equivalentes a 0,06–0,18 Mt de producción anual bajo condiciones típicas. Para el hidrógeno azul, la meta es de 50 kt. Adicionalmente, se contabilizan 30 proyectos en desarrollo con una capacidad proyectada de 6,73 GW, lo que posiciona a Colombia como segundo en la región en términos de escala potencial. [118]



Costa Rica

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde establece una meta de 200 a 1000 MW de electrólisis en operación o desarrollo hacia 2030. Esto equivale a entre 11 y 58 ktH2/año bajo condiciones de eficiencia habituales. La proyección de demanda local es de aproximadamente 20 ktH2/año, lo que sugiere que la

mayor parte de la producción se destinaría al consumo interno. Actualmente, sin embargo, solo existe un piloto en operación a escala marginal, lo que refleja el carácter incipiente de la industria en el país [119].



México

En ausencia de una hoja de ruta oficial del Estado, la asociación H2México publicó una estrategia que proyecta la demanda local de hidrógeno en 230 kt/año hacia 2030 y 2700 kt/año en 2050. Estas estimaciones reflejan requerimientos de producción equivalentes, aunque no consideran exportaciones ni están validadas institucionalmente. En términos de proyectos, México cuenta con iniciativas que totalizan 1,35 GW de capacidad potencial, lo que equivale a una oferta aún incipiente en comparación con países vecinos [120].



Uruguay

La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde presenta estimaciones basadas en el tamaño del mercado doméstico e internacional más que en volúmenes físicos de producción. Se proyecta que el mercado doméstico de hidrógeno y derivados alcance 217 MUSD en 2030 y 751 MUSD en 2050, mientras que las exportaciones crecerían de 95 MUSD en 2030 a 1326 MUSD en 2050. Actualmente, se identifican proyectos que totalizan 1,16 GW de electrólisis, aunque la estrategia del país prioriza el abastecimiento del mercado interno en fases tempranas de desarrollo. [121]

El análisis regional permite dimensionar mejor la disponibilidad efectiva. Bajo un escenario moderado en el cual solo un 27,5% de los proyectos anunciados se concretarían la capacidad instalada en base a la potencia anunciada en los países de la red se reduciría a 10,7 GW en Chile, 1,85 GW en Colombia, 0,37 GW en México y 0,32 GW en Uruguay [122]. Esto equivale a una producción aproximada de 1 564 kt/año en Chile, 270 kt/año en Colombia, 54 kt/año en México y 47 kt/año en Uruguay, mientras que Costa Rica mantendría una contribución marginal. Estos valores dependen de factores de operación y eficiencia tecnológica, pero ilustran un volumen relevante para el escalamiento de aplicaciones locales y generación de excedentes exportables. No obstante, menos del 10% del hidrógeno producido en proyectos a gran escala se destina a consumo local, mientras que más del 90% se concentra en derivados como amoníaco o combustibles sintéticos para exportación (International Energy Agency [IEA], 2023). Incluso así, esa fracción limitada puede representar volúmenes suficientes. Tal como se ejemplificó para el cálculo de la huella de carbono un camión FCEV (ver sección 2.4), se requieren para su vida útil 77,5 toneladas de hidrógeno. Esta baja capacidad de producción asociada respecto a la escala anunciada de los proyectos permitiría impulsar aplicaciones locales estratégicas en sectores como transporte de carga, minería o generación distribuida, contribuyendo a la consolidación de ecosistemas de hidrógeno en paralelo al desarrollo de los mercados de exportación.

3.6 Barreras y oportunidades en zonas urbanas y aisladas

La adopción de la electromovilidad con hidrógeno o baterías, así como el plan de instalación y expansión de HRS, depende de planificaciones y estrategias tanto a nivel país como a nivel industrial. Según esto, tanto el vehículo objetivo (grúas horquilla, automóviles, camiones, buses, trenes u otros) como su propósito (transporte de pasajeros urbano o rural, transporte de carga de corta o larga distancia, etc.) varían en función de factores tecnológicos, económicos y sociales. Particularmente, en esta sección se analizan las aplicaciones enfocadas en centros poblados vs. zonas aisladas, así como sus barreras y oportunidades. Para esto, se identifican las características de cada país y los tipos de proyectos que podrían implementarse en zonas urbanas o zonas aisladas, para luego analizar cuáles modelos podrían implementarse en cada país.

Para cada país de la red, la definición de zonas pobladas y zonas aisladas varía. En este sentido, se identifican tres factores fundamentales:

- **Concentración de la población:** En zonas de alta densidad poblacional, la demanda de transporte —tanto público como privado— es más predecible, concentrada y suficiente para justificar infraestructuras de abastecimiento centralizadas y de alta capacidad. Las economías de escala favorecen la implementación de HRS públicas o privadas que abastezcan a múltiples usuarios. Por el contrario, en zonas de baja densidad, la demanda está dispersa, lo que dificulta

la rentabilización de estaciones de gran capacidad; en estos casos predominan soluciones de menor escala o estaciones móviles que optimicen el uso de recursos.

- **Geografía:** La distribución física del territorio influye directamente en la logística y en los costos de instalación y operación de HRS. Regiones con cordilleras, desiertos, selvas o islas presentan mayores desafíos de transporte y conectividad, lo que hace atractivas soluciones descentralizadas de producción local de hidrógeno mediante electrólisis alimentada por energías renovables. En contraste, zonas geográficamente accesibles permiten un mayor aprovechamiento de redes logísticas existentes y facilitan el suministro centralizado.
- **Conectividad:** La calidad y extensión de las vías de transporte y redes energéticas condicionan la factibilidad técnica. En áreas bien conectadas, la distribución de hidrógeno desde centros de producción hacia estaciones urbanas o interurbanas puede ser eficiente y competitiva. En zonas aisladas, con carreteras limitadas o con transporte fluvial o marítimo, la logística se complica y encarece, lo que hace preferible la generación in situ de hidrógeno y el uso de HRS autónomas para minimizar la dependencia externa.

Estos factores se utilizan para definir las características urbanas a considerar y las características de zonas aisladas de cada país objetivo, las cuales se observan en la **Tabla 12**.

Por otro lado, se identifican tipos de proyectos asociados a la electromovilidad con hidrógeno y a la red de HRS en América Latina, de acuerdo con la oportunidad que presentan en zonas urbanas o en zonas aisladas.

En zonas urbanas, las oportunidades principales se encuentran en:

- Transporte público y privado urbano, incluyendo automóviles particulares, buses, taxis y flotas corporativas. En este caso, se considera más conveniente la existencia de HRS públicas (de terceros) dentro del sector urbano.
- Transporte industrial y de mercancías asociado a zonas industriales cercanas a las ciudades, con alta frecuencia de rutas y demanda concentrada, lo que favorece economías de escala para HRS centralizadas, ya sea particulares (mismo dueño de la flota de vehículos) o públicas (de terceros).

En zonas aisladas, se identifican al menos dos focos de interés:

- Independencia energética local mediante HRS con autoproducción de hidrógeno a partir de electrólisis alimentada por energías renovables, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles importados. Esto aplica para casos con beneficio económico o social, donde la alternativa convencional suponga grandes costos y logística de transporte y adquisición, por ejemplo, islas lejanas al continente.
- Soporte al transporte rural y a industrias intensivas en energía situadas lejos de las urbes, como minería, forestal, pesca industrial o agricultura remota.

En estos casos, la viabilidad debe evaluarse caso a caso, considerando la densidad poblacional y la conectividad, así como el beneficio social y económico en transporte de personas. Para el sector privado, se requiere un análisis comparativo de costo/beneficio frente a combustibles tradicionales u otras alternativas sostenibles.

Del análisis y cruce de ambos enfoques, se construye la **Tabla 12**, donde se comparan las características urbanas y de zonas aisladas por país, para proponer tipos de proyectos recomendados. Se observa que en países de alta densidad poblacional (Costa Rica, México), las HRS y los sistemas urbanos de electromovilidad con hidrógeno cobran mayor relevancia. En cambio, en países con menor densidad y con amplias zonas aisladas (Chile, Argentina), se observa un mayor potencial de producción “off-grid” como recurso de independencia energética. No obstante, todos los países estudiados cuentan tanto con zonas altamente pobladas como con zonas aisladas de baja conectividad, por lo que se recomienda realizar un estudio en mayor profundidad y una evaluación costo/beneficio caso a caso.

Tabla 12 Tipos de proyectos recomendados por país de la red según características de zonas urbanas y aisladas. Adaptado [122,123]

País	Densidad poblacional (hab./km²)	Características urbanas	Características zonas aisladas	Tipos de proyectos recomendados
Chile	≈ 26	Alta concentración en la zona central (Santiago, Valparaíso, Concepción). Alta demanda de transporte público y de carga en áreas metropolitanas. *Ej.: Corredor de buses de hidrógeno en Santiago.*	Extensas áreas mineras en el norte y territorios remotos en Patagonia. Baja conectividad y condiciones extremas. *Ej.: HRS en faenas de cobre en Antofagasta.*	HRS urbanas para transporte público y carga industrial + HRS off-grid alimentadas por renovables para minería y logística de larga distancia.
Argentina	≈ 17	Ciudades grandes y medianas con zonas industriales cercanas. Potencial en transporte de carga interurbano. *Ej.: Corredor Buenos Aires–Rosario.*	Amplias zonas rurales y patagónicas con baja densidad, alta dependencia de diésel. *Ej.: Estación en Comodoro Rivadavia para transporte petrolero.*	Hubs regionales de HRS para transporte agrícola/industrial + estaciones autónomas para corredores rurales clave.
México	≈ 66	Megaciudades con alta demanda de transporte y zonas industriales urbanas. Corredores logísticos troncales. *Ej.: HRS en zona industrial de Monterrey.*	Áreas rurales extensas con conectividad variable, climas diversos. *Ej.: Estación en Oaxaca para transporte agrícola.*	Red de HRS en corredores federales + estaciones urbanas para transporte público y mercancías.
Costa Rica	≈ 100	Alta densidad urbana, buen acceso a renovables. Transporte turístico y público con rutas cortas. *Ej.: Buses de hidrógeno en San José.*	Áreas rurales de menor tamaño, pero con actividad agrícola y turística. *Ej.: Estación en Guanacaste para transporte turístico y agrícola.*	HRS urbanas conectadas a transporte público/turístico + estaciones regionales para áreas agrícolas clave.
Colombia	≈ 47	Corredor andino con alta densidad y transporte interurbano intenso. *Ej.: HRS en Bogotá–Medellín.*	Zonas amazónicas y rurales con difícil acceso. *Ej.: Estación en Leticia para transporte fluvial y terrestre local.*	HRS en corredores interurbanos estratégicos + soluciones autónomas para regiones aisladas.
Uruguay	≈ 19	Montevideo y ciudades costeras con transporte urbano y portuario relevante. *Ej.: HRS en Puerto de Montevideo.*	Interior agrícola y ganadero con baja densidad. *Ej.: Estación en Tacuarembó para maquinaria agrícola.*	HRS urbanas en capital y puertos + estaciones regionales para transporte agrícola/ganadero.

Barreras y oportunidades transversales

Zonas urbanas

Barreras

- Alta competencia con soluciones de electromovilidad a batería, especialmente para vehículos ligeros y rutas cortas.
- Limitaciones de espacio en centros urbanos para instalar HRS, debido a requerimientos de seguridad y normativas.
- Necesidad de marcos regulatorios claros y homologación de estándares de seguridad para el manejo de hidrógeno, por ejemplo, en estaciones públicas multicombustible.
- Mayor riesgo de percepción pública negativa sobre la seguridad del hidrógeno, lo que requiere campañas de información.

Oportunidades

- La alta densidad de usuarios y la frecuencia de rutas permiten economías de escala para HRS centralizadas.
- Mayor facilidad de acceso a inversión privada y financiamiento público, dado el volumen de demanda potencial.
- La infraestructura existente (vial, eléctrica y de gas) facilita la instalación y operación de HRS.
- Diversidad de aplicaciones: transporte público, flotas corporativas, logística de última milla y transporte interurbano corto.

Zonas aisladas

Barreras

- Escala reducida de demanda que dificulta la rentabilidad de las HRS si no se integran con aplicaciones industriales de gran consumo.
- Altos costos logísticos y de mantenimiento por falta de proveedores y técnicos cercanos.
- Dependencia de soluciones off-grid que requieren alta inversión inicial en generación renovable y almacenamiento.
- Riesgo de obsolescencia tecnológica si no se asegura un suministro constante de piezas, servicios y capacitación local.

Oportunidades

- Viabilidad de independencia energética mediante producción local de hidrógeno con energías renovables, reduciendo dependencia de combustibles fósiles importados o transportados.
- Aplicaciones de valor estratégico en industrias intensivas en energía como minería, forestal, pesca industrial o agricultura remota.
- Potencial de descarbonización de flotas aisladas donde la electrificación con baterías presenta desafíos técnicos (autonomía, recarga).
- Posibilidad de integrar HRS multifuncionales que atiendan tanto transporte industrial como comunitario, maximizando su uso.

3.7 Proyectos de electromovilidad con hidrógeno y HRS

Esta sección presenta un panorama actualizado de los principales proyectos identificados en los países objetivo, destacando casos representativos, modelos de implementación y aprendizajes iniciales sobre la adopción de FCEV y la instalación de HRS. Se identificaron 24 proyectos de electromovilidad con hidrógeno en los países de la Red RH2, de los cuales 14 corresponden a buses y camiones. Además, se contabilizan 13 HRS asociadas a los distintos proyectos, como se muestra en la **Figura 9.** Es importante notar que la totalidad de proyectos corresponde a un universo más amplio y no se obtiene de la suma de los proyectos con buses/camiones y aquellos con HRS. Estos constituyen subconjuntos dentro del total, dado que existen iniciativas de electromovilidad que incorporan HRS sin considerar buses o camiones, así como proyectos con buses o camiones que no contemplan infraestructura de HRS.

La cifra total incluye diversas aplicaciones de movilidad con hidrógeno, tanto en vehículos livianos como pesados, para transporte de carga y de pasajeros. Se consideran tanto FCEV como aquellos que utilizan

otros sistemas de propulsión, como la combustión dual. No obstante, para efectos del análisis del estudio, se incluye únicamente a los proyectos de buses y camiones propulsados por celdas de combustible, quedando fuera del alcance aquellos que utilizan tecnologías distintas o que no cumplen con los criterios técnicos definidos.

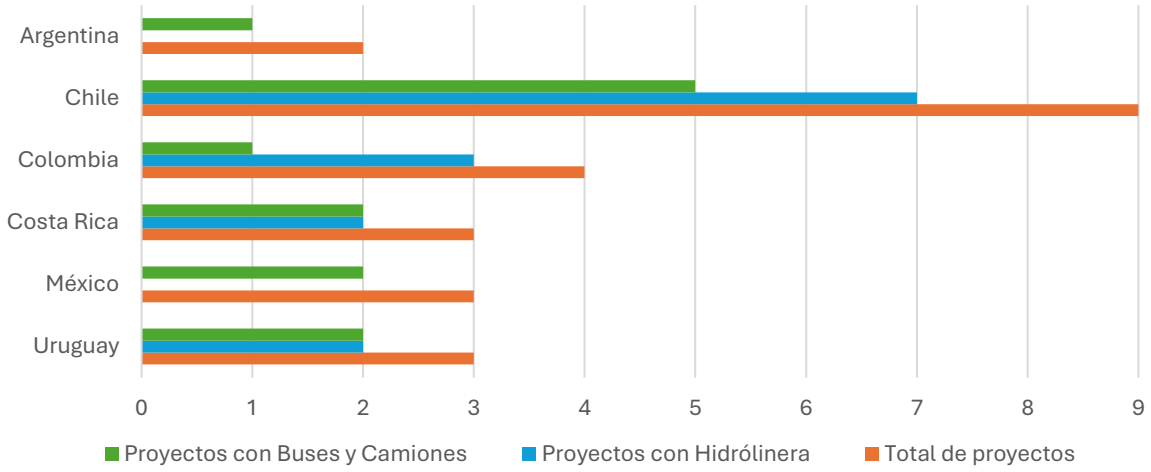

Figura 9 Cantidad de proyectos de electromovilidad con H2 en países de la Red RH2

Argentina

1. Argentina aún no cuenta con proyectos de producción/consumo hidrógeno renovable en operación comercial, sin embargo, se están desarrollando iniciativas clave en el ámbito de la movilidad sostenible. Destaca el desarrollo del primer bus a hidrógeno verde, financiado por la Secretaría de Transporte y Movilidad de La Rioja, el cual representa un hito para la transición energética en el país.
2. También se reporta la presencia del Toyota Mirai en el país, en la categoría de vehículos livianos demostrativos, actualmente en modalidad piloto.

   Otro caso de movilidad a combustión dual con hidrógeno es el proyecto para convertir un chasis de ómnibus diésel Mercedes-Benz en un colectivo híbrido, destinado al transporte de pasajeros en zonas de alta concurrencia. Esta iniciativa constituye un avance hacia la descarbonización del transporte público argentino.

Chile

1. El primer piloto consistió en el desarrollo de un tren de potencia para vehículos mineros, llevado a cabo por el consorcio Hydra, conformado por ENGIE, Mining3, Antofagasta Minerals, Mitsui & Co. (USA), Thiess, Ballard Power Systems, Hexagon Purus, Reborn Electric Motors y Liebherr Mining, con apoyo de CORFO y CSIRO.
2. Se introdujo el Toyota Mirai, el primer vehículo a hidrógeno homologado en Chile, acompañado de una HRS con generación in situ dedicada exclusivamente a su recarga.
3. Anglo American instaló una estación de repostaje con generación in situ en Las Tórtolas para suministrar hidrógeno a una grúa horquilla operativa en sus faenas.
4. Walmart, en conjunto con ENGIE, está construyendo una planta industrial para producir hidrógeno y convertir 200 grúas horquilla eléctricas al sistema de hidrógeno.
5. La Universidad Técnica Federico Santa María desarrolló un prototipo de camioneta a hidrógeno para su validación en entornos mineros.
6. En 2023 se puso en marcha el primer bus interurbano a hidrógeno, fruto de la colaboración entre Andes Motor, Anglo American, Buses Hualpén, Copec Voltex y Linde. El modelo Foton está en fase de pruebas y transporta trabajadores de Anglo American desde una HRS construida por COPEC y Linde en Pudahuel.

7. En el transporte de carga destaca el Proyecto HidroHaul, que presentó el primer camión de larga distancia a hidrógeno verde en Chile. Con autonomía de 750 km y capacidad para 49 toneladas, fue financiado por el Programa Tecnológico de Corfo (PTEC) con una inversión de 400 000 USD, como parte de la estrategia de Walmart para ampliar esta tecnología en su cadena logística.
8. Reborn Electric lidera el retrofit del primer bus a hidrógeno desarrollado y fabricado en Chile. Con capacidad para 30 pasajeros, autonomía de 600 km y diseñado para operar en entornos industriales, urbanos y rurales, el proyecto, dentro del programa Crea y Valida de Corfo, cuenta con un presupuesto de 755 000 USD, cofinanciado por Colbún, Anglo American y Corfo. Además, dispone de una HRS propia y se encuentra en fase de validación técnica y operativa.
9. Sotraser añadió a su flota un tractocamión Foton E AUMAN 2549 6X4 impulsado por hidrógeno.
10. El proyecto de producción de HIF para la combustibles sintéticos a partir de hidrógeno verde, con el propósito de zanjar incertidumbres tecnológicas, generar conocimiento específico de operación y utilizar dichos combustibles para vehículos de la marca Porsche.
11. FCAB incorporó a su flota el primer tren a hidrógeno en Sudamérica, desarrollado en Antofagasta. Combina pila de combustible y baterías para reemplazar el diésel, con cero emisiones y diseño adaptado a condiciones extremas del norte de Chile.
12. KH2 comercializa bicicletas equipadas con celda de combustible y estanque de hidrógeno a alta presión. Ofrecen autonomía de hasta 150 km y recarga en pocos minutos, como alternativa a las e-bikes convencionales.
13. El Centro Mario Molina ha participado en el desarrollo del FCEV eC36H2 junto a QEV Technologies, que tiene una autonomía cercana a 500 km y aplicaciones en minería, logística y transporte de pasajeros.

Adicionalmente, según el registro de la SEC, actualmente existen ocho HRS autorizadas en el país, de las cuales una se encuentra inactiva. Desde el sector público, el Ministerio de Energía, junto al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y la Dirección de Transporte Público Metropolitano, se comprometió a impulsar un bus piloto de hidrógeno verde en el transporte público, según lo estipulado en la Acción 56 del Plan de Acción del Hidrógeno Verde 2023-2030.

Colombia

1. El primer camión de carga dual hidrógeno-diésel desarrollado por Grupo Familia, en conjunto con Opex, Solenium y Unergy, operará en modalidad piloto con una reducción de consumo superior al 10% en recorridos de más de 150 kilómetros por carga. Este vehículo reemplazaría el uso de aproximadamente 400 galones de diésel al año y se suma a una flota de 13 vehículos de bajas emisiones que ya operan con gas natural y electricidad, como parte de los esfuerzos de la empresa por alcanzar cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050.
2. El Toyota Mirai también se encuentra en operación piloto en el Parque de Movilidad del Centro de Innovación y Tecnología del Caribe, en la ciudad de Cartagena. Este piloto, con una duración de tres años, se enmarca dentro del plan estratégico de Ecopetrol para innovar frente a los desafíos de la transición energética, y el vehículo es abastecido con hidrógeno producido y dispensado por las instalaciones del propio centro.
3. Opex y Hyundai desarrollan conjuntamente el proyecto Hevolución, que contempla la construcción de una planta industrial de producción de hidrógeno con capacidad para abastecer vehículos Hyundai Nexus, incluyendo su repostaje.
4. Por último, el primer bus de transporte público impulsado por hidrógeno comenzó a operar en Bogotá bajo el liderazgo de Transmilenio y Ecopetrol. El vehículo tiene capacidad para 50 pasajeros, mide 8,9 metros de largo y cuenta con una autonomía de 450 km. El proyecto incluye una estación de servicio con HRS para producir hidrógeno de bajas emisiones, lo que permitirá evitar la emisión de aproximadamente 1.083 toneladas de CO_2. Se ha anunciado además la expansión futura a 13 buses adicionales. La inversión total fue de 22 000 millones de pesos colombianos, con aportes de Fenoge, Ecopetrol y Fanalca.

Otros casos de movilidad liviana incluyen un vehículo dual desarrollado para pruebas piloto por Minera de Cobre Quebradona, en alianza con Quintil Valley, Solenium, Energética y Andes H2. Este proyecto busca reducir emisiones mediante la mezcla de hasta un 30% de hidrógeno en la combustión del motor.

Costa Rica

1. Costa Rica implementó su primer bus eléctrico impulsado por hidrógeno a finales de 2017, en la provincia de Guanacaste, liderado por la empresa Ad Astra Rocket Company. El vehículo tiene capacidad para 35 pasajeros sentados y 70 de pie, con una autonomía superior a los 300 km. El proyecto se desarrolló mediante alianzas con empresas privadas y el respaldo gubernamental, con una inversión cercana a los 4 millones de USD.
2. El piloto comenzó en 2013 con la construcción de una planta para la producción de hidrógeno, y posteriormente se amplió con la instalación de una HRS, que actualmente abastece tanto al bus como a cuatro vehículos livianos utilizados para transporte de pasajeros. El proyecto se encuentra en fase de validación y escalamiento, con miras a su transición hacia una operación comercial.
3. Por otro lado, el proyecto de la Alianza por el Hidrógeno contempla la importación de 10 camiones impulsados por hidrógeno, junto con la construcción de una planta de producción y dispensado. Sin embargo, este proyecto ha sido solo anunciado, y hasta el momento no se han informado fechas ni hitos confirmados para su ejecución.

México

1. Se ha reportado la llegada de buses y camiones de la marca Fotón al país; sin embargo, se desconoce el usuario final de estos vehículos, así como su vinculación con otros proyectos concretos (tanto el bus Fotón como el camión Fotón).
2. El proyecto Hidrobinisa, considerado el primer vehículo impulsado por hidrógeno fabricado en México, fue desarrollado por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN). Este vehículo combina elementos de un automóvil solar con la autonomía proporcionada por una celda de combustible.
3. Adicionalmente, se reporta la disponibilidad comercial de vehículos livianos impulsados por hidrógeno en el país.

Uruguay

1. El Proyecto H24U fue seleccionado entre diez propuestas y cuenta con un financiamiento estatal de 10 millones de USD no reembolsables, distribuidos en 10 años. Los fondos se destinan a la construcción de una HRS y a la operación de camiones impulsados por hidrógeno para la empresa forestal Celulosa UPM. Además, las empresas Saceem y CIR, en colaboración con Air Liquide, aportarán una inversión de 43.5 millones de USD, mientras que el Fondo Sectorial del Gobierno contribuirá con otros 10 millones de USD. Este proyecto se enmarca dentro de la estrategia nacional de descarbonización y transición energética.
2. Asimismo, Toyota presentó sus vehículos modelo Mirai en Uruguay, en modalidad piloto.
3. Por otra parte, el Proyecto Kahirós, ubicado en Fray Bentos, se enfoca en la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis, alimentada por un parque solar privado respaldado por el Sistema Interconectado Nacional (SIN). El proyecto contempla un electrolizador de 2 MW con capacidad de generar 76.7 toneladas anuales de hidrógeno, además de una HRS propia. Este suministro permitirá operar 10 camiones de alta presión (700 bar), que reemplazarán unidades diésel en la empresa Montes del Plata para el transporte de madera. Cada vehículo tendrá una autonomía de 800 km. La inversión total asciende a 38,6 millones de USD, gestionada por el consorcio Ventus, Fidocar y Fraylog, con el apoyo del Grupo Santander.

   Hasta la fecha, ninguna de las HRS asociadas a estos proyectos se encuentra operativa. Adicionalmente, uno de los proyectos a desarrollar se congeló. El Proyecto Verne tuvo como objetivo implementar un piloto de producción de hidrógeno verde para su uso en ómnibus interurbanos y camiones de carga por carretera. En 2019, recibió un préstamo no reembolsable de 200 000 USD del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) destinado a cooperación técnica. Sin embargo, la licitación prevista para 2020 no se concretó, lo que detuvo temporalmente su desarrollo.

Una parte significativa de los proyectos anunciados y en desarrollo en la región corresponde a la electromovilidad con hidrógeno para el transporte de carga y pasajeros, es decir, camiones y buses, lo cual se alinea con los usos prioritarios definidos en los instrumentos de planificación nacionales. En el caso de los vehículos livianos (fuera del alcance de este estudio), predominan iniciativas piloto y demostrativas, como el modelo Toyota Mirai, presente en todos los países de la Red. En cuanto a las HRS se consideraron únicamente aquellas que han sido anunciadas o están en operación. Por lo tanto, no es correcto asumir que cada país cuenta con una cantidad equivalente de HRS activas. Además, debe destacarse que la mayoría de las estaciones identificadas están diseñadas como parte integral de proyectos específicos, con capacidades y características técnicas adaptadas a cada caso. Esto significa que una vez construidas, no necesariamente estarán disponibles para otros usos ni serán compatibles con distintas aplicaciones de electromovilidad, ya que su uso dependerá del criterio del propietario de la infraestructura.

El gráfico de la **Figura 10** muestra una aceleración en los proyectos de transporte con hidrógeno en América Latina desde 2022, liderada por Chile, que alcanza 8 iniciativas en 2024 y 2025. Costa Rica fue pionera con actividad sostenida desde 2017, aunque sin crecer en los últimos años. Uruguay y Colombia mantienen un ritmo estable, mientras Argentina muestra un despegue reciente. México, en contraste, no registra proyectos, evidenciando una brecha significativa en la región.

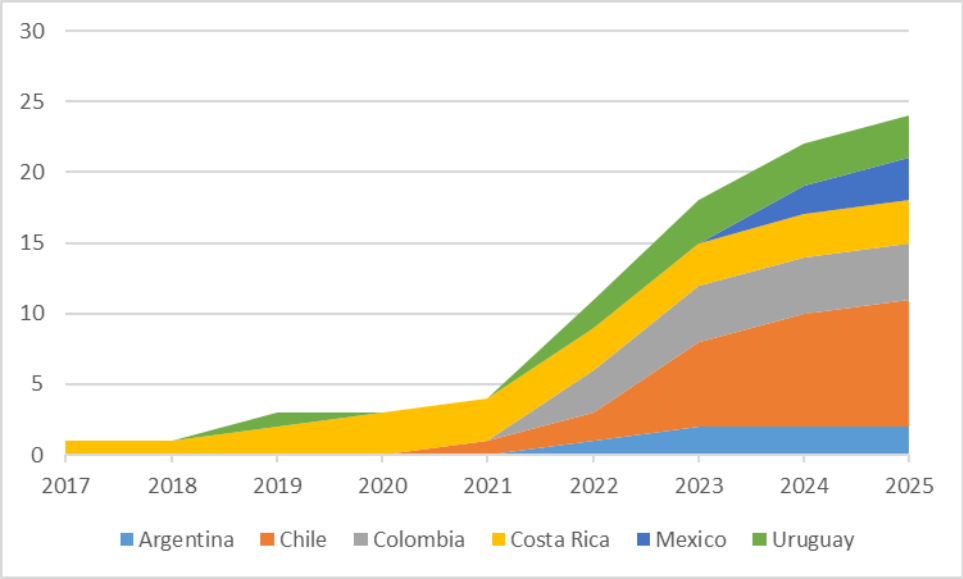

Figura 10 Evolución de la cantidad de proyectos de movilidad con hidrógeno en los países de la red RH2

Estos casos reflejan el estado actual y la proyección de la electromovilidad con hidrógeno en la región, destacando la diversidad de enfoques, modelos de financiamiento y niveles de madurez tecnológica. El despliegue de estaciones de recarga es un factor clave para la adopción de flotas FCEV, y cada país enfrenta desafíos particulares según su matriz energética, infraestructura de transporte y estrategias de transición energética.

3.7.1 Modelos de negocios y estrategias de mercado en Latam

De los proyectos presentados, se identifican los proyectos con información pública respecto a los actores propietarios de la tecnología vehicular, HRS y usuario. Con esta información, se analiza su modelo de negocio y estrategia comercial según las definiciones de la sección 2.5.1, tal como se presenta en la **Tabla 13.**

Tabla 13 Clasificación de proyectos de electromovilidad a hidrógeno en Latam según modelo de negocio.

País	Proyecto	Modelo de negocio	Justificación
ARG	Bus Y-TEC	**B2I**	Es un proyecto de innovación tecnológica nacional, no orientado a consumidores finales ni flotas privadas, sino a validación interna y demostración.
CH	Bus AngloAmerican - Hualpen	**B2B**	La HRS es de COPEC/Linde, los vehículos los opera Hualpén y el usuario final es AngloAmerican; corresponde, por tanto, a una relación entre empresas.
CH	HidroHaul	**B2B**	La HRS es propia de Engie/COPEC, el operador privado es Marval y el usuario final es Walmart, configurándose como una interacción empresa–empresa.
CH	MTT	**B2I**	Proyecto piloto de carácter interno, sin información de usuario final ni venta directa.
CH	Retrofit Reborn	**B2B**	Retrofit de camiones a hidrógeno realizado por la empresa Reborn, con operador privado (AngloAmerican); se trata de una relación entre empresas.
CH	Sotraser	**B2I**	Empresa de transporte (Sotraser) que utiliza hidrógeno en su propia flota privada.
CO	Bus Transmilenio	**B2G**	Proyecto de transporte público en el que el operador privado (Green Móvil) presta el servicio final al gobierno (SITP).
CR	Bus Ad Astra	**B2I**	La empresa Ad Astra desarrolla y opera el bus como piloto y transporte ocasional privado. Se trata de un caso interno con proyección comercial.
CR	Camiones	**B2I**	Información incompleta, pero al ser piloto sin cliente final, se asume prueba interna.
MX	Bus Fotón	**B2I**	Proyecto en fase inicial, sin detalle de cliente ni HRS, más cercano a un piloto interno.
MX	Camión Fotón	**B2I**	Al igual que el caso anterior, se trata de un piloto sin cliente claro, orientado a validación interna.
UY	H24U	**B2B**	Proyecto con hidrógeno destinado a empresas forestales (UPM) como clientes finales; corresponde a una relación empresa–empresa.
UY	Kahiros	**B2B**	La empresa Kahíros opera camiones propios de hidrógeno, con Montes del Plata como usuario final, configurándose como una relación entre empresas.

De los resultados obtenidos se observa que la mayoría de las iniciativas se enmarcan en modelos B2I y B2B, lo que refleja el carácter incipiente de la industria en la región. Los casos B2I corresponden principalmente a pilotos internos y de validación tecnológica (ej.: Y-TEC en Argentina, Ad Astra en Costa Rica, proyectos iniciales en México y MTT en Chile), que permiten a las organizaciones adquirir experiencia sin depender de la articulación de múltiples actores externos o grandes financiamientos.
Por otro lado, los modelos B2B aparecen en proyectos más avanzados, donde empresas privadas proveen servicios a otras compañías (ej.: Hualpén con AngloAmerican, HidroHaul con Walmart, H24U con UPM y Kahíros con Montes del Plata). Esto demuestra que la primera vía de masificación se orienta a clientes corporativos capaces de absorber los costos iniciales.

Finalmente, solo se identifica un caso B2G (Transmilenio en Colombia), lo que evidencia que la participación del sector público aún es limitada, probablemente debido a los requerimientos de inversión y subsidios. En conjunto, esta tendencia sugiere que el ecosistema regional avanza de manera gradual, priorizando proyectos internos y corporativos antes de alcanzar esquemas masivos orientados al consumidor final.

3.8 Diagnóstico de regulación, financiamiento y capital humano en Latam

A partir del levantamiento y análisis de información del desarrollo de la electromovilidad impulsada por hidrógeno en América Latina y el Caribe presentado en las secciones anteriores, se realiza un análisis cualitativo-cuantitativo para determinar el grado de avance en los países de la Red RH2 respecto a tres dimensiones clave: regulación, financiamiento y capital humano.

Para ello, se estableció un conjunto de indicadores clave de desempeño (KPIs) y aplicó una rúbrica de evaluación común basada en información concreta sobre el estado actual de cada país.

En base a la información recopilada por el equipo consultor se asignó un puntaje entre 0 y 1 a cada una de las preguntas, resultando en una métrica de 0 a 4 para cada uno de los KPI evaluados.

KP1. Regulación

- ¿El país cuenta con instrumentos de planificación que contemplen la regulación?
- ¿Existen casos concretos de homologación de FCEV?
- ¿Existe un proceso claramente definido para homologar este tipo de vehículos?
- ¿Se ha establecido normativa específica en materia de seguridad?

KP2. Financiamiento

- ¿Se incluyen instrumentos de planificación con foco en financiamiento?
- ¿Existen incentivos o mecanismos de financiamiento para la electromovilidad?
- ¿Se contemplan fondos o apoyos específicos para proyectos de hidrógeno?
- ¿Existen instrumentos dirigidos específicamente a la electromovilidad con hidrógeno?

KP3. Capital humano

- ¿El país posee instrumentos de planificación relacionados con esta dimensión?
- ¿Existen programas de formación específicos en hidrógeno?
- ¿Se dispone de industrias preexistentes compatibles (electromovilidad, oil & gas)?
- ¿El país cuenta con proyectos de electromovilidad con hidrógeno que permitan formación de capacidades in-house?

Los resultados del análisis cuantitativo se presentan en la **Figura 11.** Tras el análisis cualitativo, se puede concluir lo siguiente:

En **regulación**, el progreso se ve un plano general, destacándose marcos regulatorios para la seguridad del hidrógeno y diseño de instalaciones. Sin embargo, de los 6 países considerados, solo Chile cuenta con normativas de seguridad específicas a FCEV y HRS, además de proceso definidos para la homologación, lo que afecta la certeza regulatoria, los plazos de implementación y, por ende, la viabilidad de los proyectos.

En **financiamiento**, los puntajes obtenidos para este KPI son similares entre países. Actualmente, existen instrumentos que aplican a proyectos de electromovilidad con hidrógeno. Sin embargo, aunque la mayoría de los países expresa en sus hojas de ruta el desarrollo de mecanismos de fomento o fondos específicos, no se identificaron instrumentos exclusivos al momento del análisis.

En **capital humano** se observan avances relevantes, ya que la mayoría de los países cuenta con estrategias nacionales y hojas de ruta que lo impulsan y programas de formación específicos (diplomados, maestrías, etc). Destacan Chile, Uruguay, Colombia y Costa Rica, que ya cuentan con proyectos en marcha, lo que permite generar capacidades técnicas desde la operación misma.

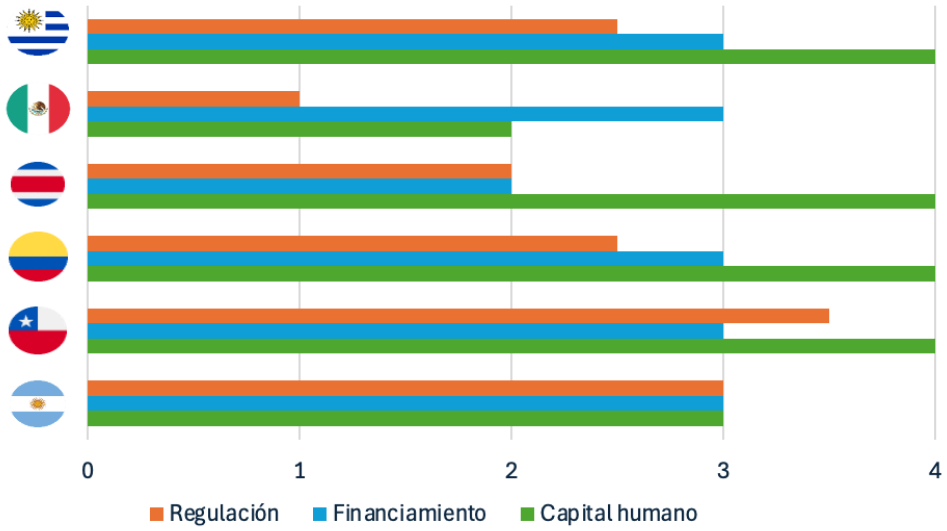

Figura 11 Análisis cuantitativo de índices claves por parte de la consultora

4. Validación de mercado

Si bien es posible acceder a información técnica, normativa y de proyectos a través de fuentes secundarias, resulta fundamental incorporar la percepción local para comprender en profundidad las oportunidades y barreras en torno a la movilidad a hidrógeno en cada país. Con este objetivo, se realizaron entrevistas semiestructuradas a actores del sector público, privado y académico, abordando tres dimensiones clave: regulación, financiamiento y capital humano. Las entrevistas fuero dirigidas tanto a actores públicos como privados, donde este último grupo se conformó por actores orientados al desarrollo de proyectos de movilidad con hidrógeno y por fabricantes de vehículos y estaciones de repostaje de hidrógeno.
Esta validación cualitativa permitió identificar la madurez relativa del ecosistema en cada país y complementar los diagnósticos previos con insumos contextuales y actualizados directamente desde el terreno.

Argentina
El país cuenta con capacidades industriales y técnicas, especialmente derivadas del sector oil & gas, que podrían ser transferidas al desarrollo del hidrógeno. Sin embargo, las condiciones macroeconómicas y la falta de estabilidad política limitan el financiamiento local, por lo que se recurre a fuentes internacionales. La regulación comienza a consolidarse y el capital humano cuenta con una base sólida, aunque requiere actualización específica en hidrógeno.

Chile
El ecosistema nacional muestra un avance incipiente pero dinámico. Empresas como Reborn Electric y Toyota han desarrollado proyectos de FCEV, centrados principalmente en el sector minero e industrial. Los desafíos principales se relacionan con la escasa disponibilidad y alto costo del hidrógeno verde, así como con la necesidad de regulación específica para homologación y operación de vehículos. Existen fondos para etapas de I+D, pero no para escalamiento comercial. La formación de capital humano es reciente y aún insuficiente, aunque en expansión.

Colombia
Colombia presenta un ecosistema institucional articulado con una hoja de ruta vigente y diversas iniciativas desde el sector público y privado. Se han implementado pilotos en transporte público (como el bus de Bogotá) y se exploran mecanismos de blending en flotas logísticas. El país cuenta con incentivos tributarios y beneficios para la producción de hidrógeno, aunque no necesariamente para su uso en movilidad. La infraestructura de repostaje es aún incipiente y existen vacíos normativos en homologación y operación. El capital humano se está desarrollando mediante convenios multilaterales, diplomados y programas académicos.

Costa Rica
El proyecto impulsado por Ad Astra Rocket ha servido como piloto regional en movilidad a hidrógeno. La planta opera como centro de demostración y formación, aunque enfrenta limitaciones por su capacidad de producción. La regulación permite la homologación general de vehículos eléctricos, lo que ha facilitado la operación de FCEV, aunque persisten vacíos legales y restricciones como la prohibición de venta de hidrógeno. El financiamiento es privado y limitado, y el país carece de un marco normativo específico para el hidrógeno. Aun así, se reconoce la necesidad de convertir el piloto en una plataforma educativa.

México
El desarrollo del hidrógeno en el país se encuentra en pausa institucional, con ausencia de una hoja de ruta nacional, posiblemente debido a transiciones políticas. Pese a ello, la investigación académica ha crecido significativamente. La regulación energética permite incluir el hidrógeno con ajustes menores, pero el financiamiento es escaso y el capital humano aún limitado. El avance depende fuertemente del desarrollo de una estrategia nacional clara.

Uruguay

El país avanza con una hoja de ruta liderada por el Ministerio de Energía, con proyectos orientados a transporte pesado de larga distancia. Existen instrumentos fiscales robustos que permiten descuentos impositivos de hasta un 90% en inversiones relacionadas a tecnologías limpias. En movilidad, se reconoce la falta de opciones a gas, por lo que el hidrógeno se considera una solución directa para ciertos nichos. En cuanto a capital humano, Uruguay cuenta con sólidas bases académicas e investigación consolidada en hidrógeno y movilidad, con cursos específicos en universidades como la de Montevideo y la Católica, además de grupos de investigación en diversas casas de estudio. Asimismo, el Fondo Sectorial de Energía de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) ha financiado desde hace varios años proyectos relacionados con hidrógeno y aplicaciones en transporte.

Los KPIs promedio de los países de la Red RH2 se presentan en la **Figura** 12.

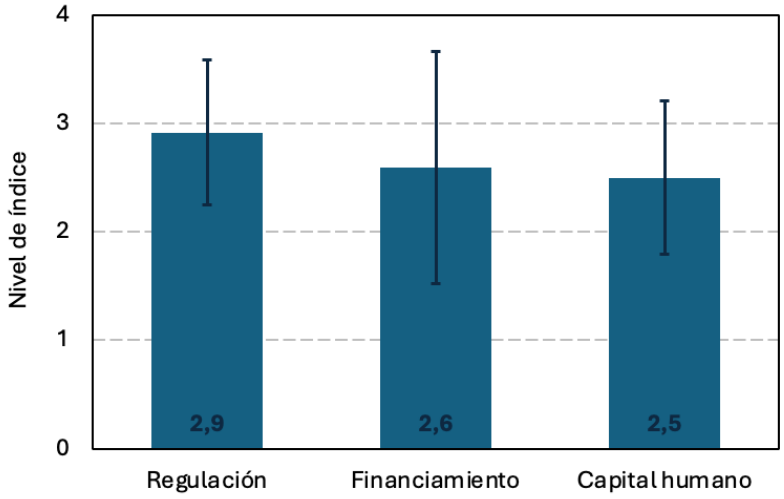

Figura 12 Percepción Latam del crecimiento del mercado de H2 local

En general, se observa que los valores objetivos -determinados a partir del análisis de información- son superiores a los promedios de percepción reportados por los actores entrevistados.

Las diferencias podrían explicarse por la interpretación personal de los entrevistados de los KPI, desconocimiento del estado de avance en la industria, matices contextuales y barreras percibidas que no siempre son visibles desde la información técnica disponible. Aunque un país cuente con normativa o planificación formal, la falta de operatividad en la práctica (como accesibilidad a los procesos de homologación, financiamiento o disponibilidad de hidrógeno) tiende a generar una evaluación más baja por parte de quienes enfrentan estas barreras en proyectos reales.

Algunas formar de acercar la percepción a la realidad consiste en fortalecer la colaboración público-privada, profundizar la articulación entre estrategias nacionales y quienes las implementan, de mejorar la difusión de políticas existentes.

4.1 Principales barreras operativas y recomendaciones

Desde las entrevistas, se identifican como principales **barreras operativas** la falta de infraestructura de recarga y transporte de hidrógeno, la limitada disponibilidad inicial de H_2 renovable, los costos de vehículos y tecnologías frente a alternativas convencionales, y la ausencia de un marco normativo robusto para estaciones, homologación y estándares de calidad. A ello se suma que los incentivos financieros disponibles se concentran en etapas tempranas de I+D, sin suficiente apoyo para la masificación de usos, y que aún falta capital humano especializado y capacitación para personal técnico

en operaciones con hidrógeno. Como **recomendaciones**, se plantea avanzar en normativas claras y adaptadas al contexto local, crear esquemas de financiamiento e incentivos específicos para proyectos de movilidad y transporte pesado, fortalecer la formación académica y la capacitación práctica, y promover modelos de negocio colaborativos entre empresas de energía, transporte e industria automotriz que permitan compartir riesgos y acelerar el despliegue de proyectos.

Se destaca que el mercado de la electromovilidad con hidrógeno verde se encuentra en estado incipiente en los países de la Red. La mayor parte de los proyectos catastrados en los países corresponden a iniciativas de interés privado, contando cada uno de ellos con la infraestructura para atender sus necesidades de mantenimiento. Esto es una oportunidad de crecimiento que servirá como guía para el desarrollo de nuevos proyectos tanto en su regulación, financiamiento y capital humano.

5. Bases de simulación

Este capítulo presenta dos herramientas de simulación desarrolladas en MS Excel, diseñadas para comparar el desempeño de camiones impulsados por celdas de combustible de hidrógeno y por baterías eléctricas, en el contexto de proyectos implementados en países de la Red de Aprendizaje RH2. Ambas herramientas comparten una lógica de cálculo común, pero se ajustan según el tipo de vehículo: una orientada a buses y otra a camiones, permitiendo adaptar los parámetros técnicos, operativos y económicos a cada caso de estudio.

Las herramientas permiten ingresar datos personalizados sobre vehículos, rutas, precios energéticos, subsidios y criterios financieros. Con esta información, calculan indicadores clave como el Costo Total de Propiedad (TCO), el Valor Actual Neto (VAN) y el flujo de caja proyectado. También generan gráficos automáticos que facilitan la visualización comparativa entre tecnologías y su uso en informes técnicos, evaluaciones financieras o procesos de toma de decisiones.

Las secciones siguientes describen la lógica de cálculo, los escenarios evaluados, los resultados obtenidos y sus implicancias para el desarrollo de proyectos de transporte sostenible.

5.1 Supuestos y alcances de las herramientas de simulación

Las herramientas se construyeron sobre un conjunto de supuestos técnicos y económicos que permiten representar el desempeño de buses y camiones eléctricos bajo diferentes condiciones operativas. A continuación, se detallan las principales consideraciones incorporadas en los modelos.

5.1.1 Consideraciones técnicas

- Se incluyeron dos tipos de recorrido por país: uno corto (50–200 km) y otro largo (>200 km), para evaluar distintos modelos de negocio.
- La autonomía de cada vehículo se calculó en base al consumo energético real, considerando factores como viento y pendiente, en contraste con un escenario ideal de ruta plana y sin viento.
- El ángulo de ida es el opuesto al de vuelta; no se consideran líneas geodésicas.
- No se incorpora el consumo asociado al arranque desde reposo.
- En ausencia de datos específicos, la carga útil se estimó restando al PBV un valor estándar según la potencia del motor: para una potencia mayor o igual a 400 kW, la carga útil es de 7 toneladas; entre 200 y 399 kW, 5 toneladas; y para menos de 200 kW, 3 toneladas.
- La potencia nominal del modelo es referencial, no corresponde a la declarada por el fabricante.
- Se definieron velocidades máximas estándar: 100 km/h para buses y 90 km/h para camiones; la velocidad promedio se estimó como el 70% de esos valores.
- Se asume que las HRS y puntos de carga de electricidad se encuentran disponibles y no forman parte del proyecto evaluado.
- El tiempo de operación considera ruta, carga y permanencia en terminales.
- El vehículo comienza cada trayecto con el estanque lleno. La carga de inicio se incluye en el CAPEX como “Estanque H2”.
- El hidrógeno consumido corresponde a la suma de carga en garita y en ruta.
- Se asume un nivel mínimo de hidrógeno siempre disponible, equivalente al 10% de la capacidad del estanque.
- La velocidad de carga de hidrógeno se considera constante.
- Durante los días operativos, el vehículo se encuentra activo en alguna de las fases: ruta, carga o garita.

- En el caso de camiones, el vehículo irá cargado a su máxima capacidad tanto en el recorrido de ida como en el de vuelta

En cuanto a la **seguridad**, si bien no se modela como una variable cuantitativa principal dentro de las simulaciones, se incorpora como un **criterio habilitante** en todos los escenarios analizados. Esto implica que únicamente se consideran configuraciones tecnológicas (BEV y FCEV) que cumplen con las normativas internacionales vigentes (ISO, SAE, NFPA, entre otras). Adicionalmente, la seguridad se refleja de manera indirecta en los costos operativos, dado que las inspecciones, mantenimientos preventivos y sistemas de monitoreo constituyen parte de los gastos asociados a la operación de flotas y HRS. Finalmente, los riesgos específicos de cada tecnología —eléctricos en el caso de BEV, y de alta presión e inflamabilidad en el caso de FCEV— se incluyen como un elemento cualitativo de referencia al analizar los resultados, reconociendo que la gestión adecuada de la seguridad es una condición indispensable para la viabilidad de los proyectos.

5.1.2 Consideraciones económicas

- El salario del conductor se estimó como 2.5 veces el salario mínimo mensual del país.
- La tarifa horaria se calculó dividiendo el salario mínimo por 160 horas mensuales (20 días × 8 horas).
- Se incluyó el costo de peaje según la categoría del vehículo y la ruta evaluada.
- En el caso de buses, la tarifa de pasaje se basó en valores comerciales.
- Todas las variables monetarias fueron convertidas a dólares estadounidenses (USD), al tipo de cambio del 12 de junio de 2025.
- Los parámetros económicos considerados por país incluyen: salario mínimo, tasa de importación, IVA, seguros (responsabilidad civil, carga e integral) y costo de electricidad.
- Se proyecta una disminución progresiva en los precios de hidrógeno y electricidad.

5.2 Estructura de las herramientas de simulación

5.2.1 Base de datos

Modelos de vehículos

Se incluyeron modelos de camiones y buses eléctricos, tanto a batería como a celda de combustible. En el caso de camiones, se consideraron 10 modelos FCEV y 10 BEV; en buses, 10 modelos para cada tecnología. Para cada vehículo se registraron datos técnicos: potencia del motor, capacidad del estanque de hidrógeno o batería, autonomía nominal, carga útil o número de asientos, velocidad máxima, área frontal y peso bruto vehicular.

En todos los modelos FCEV, la potencia de la celda de combustible es menor que la del motor, ya que está dimensionada para mantener una velocidad constante, mientras que la batería cubre demandas puntuales de mayor exigencia (como arranques o pendientes). Además, para estimar los ingresos de cada proyecto, se utilizó la carga útil en el caso de los camiones y la cantidad de asientos en el caso de los buses. Estos parámetros permiten calcular el potencial económico del transporte de carga y de pasajeros, respectivamente.

En la
Tabla 14 y **Tabla** 15 se presentan los modelos de camiones y buses incorporados, respectivamente[1].

[1] Para más información al respecto, revisar la hoja “Base de datos” en la herramienta “Simulación de Camiones RH2”.

Tabla 14 Modelos de camiones incorporados en la simulación, ordenados por autonomía (km)

Marca	Modelo	Tecnología	Potencia motor eléctrico (kW)	Autonomía (km)	Carga útil[2] (ton)	Capacidad estanque H_2 (kg)
Quantron AG	QHM	FCEV	550	1300	37.0	116
Daimler	Gen H2	FCEV	460	1000	25.0	88
Nikola	TRE	FCEV	575	805	27.0	70
Hyundai	Xcient Fuel Cell	FCEV	350	600	36.0	31
MAN	hTGX	FCEV	383	600	39.0	56
FAW	J7 Heavy Truck 6x4	FCEV	290	600	44.0	42
Hyzon	HYHD8-200	FCEV	450	563	30.2	50
Hyzon	HYHD8-110	FCEV	450	563	30.2	50
Toyota Kenworth	T680	FCEV	310	480	23.0	59
Mitsubishi	eCanter F-Cell	FCEV	135	300	3.0	8
Volvo	FH Electric	BEV	490	345	29.0	N/A
Fuso	eCanter 918	BEV	129	200	4.6	N/A
JAC	NC4 Urban Furgon	BEV	171	178	6.1	N/A
Hyundai	Zedo 300 EV	BEV	120	300	1.7	N/A
Mercedes Benz	eActros 300	BEV	330	300	10.4	N/A
Mercedes Benz	eActros 400	BEV	400	400	16.6	N/A
Maxus	ET-2549	BEV	360	150	30	N/A
BYD	Q1A	BEV	180	150	10	N/A
MAN	eTGL 12t	BEV	210	235	6.6	N/A
Volkswagen	e-Delivery	BEV	300	250	8.0	N/A

Tabla 15 Modelos de buses incorporados en la simulación

Marca	Modelo	Tecnología	Potencia motor eléctrico (kW)	Autonomía (km)	Cantidad asientos	Capacidad estanque H_2 (kg)
Geely	U11F	FCEV	350	450	46	34
Hyundai	Elec City FC	FCEV	350	550	48	78
Iveco	E-Way H2	FCEV	310	450	40	31
ZeVAuto	SPK610FCEVG	FCEV	140	350	27	20
GCK	Crossway NF Coach	FCEV	370	500	50	34
Toyota	Sora	FCEV	226	200	25	35
Solaris	Urbino 18 H2	FCEV	240	600	39	38
Van Hool	A330 Fuel Cell	FCEV	170	300	45	38

[2] Una capacidad de carga superior a 26 toneladas denomina a un camión como “heavy duty”, una capacidad entre 16 y 3,5 toneladas como “médium-duty” y bajo 3,5 toneladas como “light-duty”

New Flyer	Xcelsior Charge FC	FCEV	240	600	45	38
CaetanoBus	H2 City Gold	FCEV	180	400	40	38
Yutong	IC12E	BEV	466	458	59	N/A
Mercedes Benz	eIntouro	BEV	414	375	50	N/A
Volvo	8900 Electric	BEV	540	263	50	N/A
Iveco	Crossway LE	BEV	485	300	50	N/A
MAN	Lion's City	BEV	450	285	45	N/A
Tata	Intercity EV 2.0	BEV	450	300	45	N/A
Eicher	Intercity Coach EV	BEV	400	225	52	N/A
Yutong	TCe12	BEV	400	240	50	N/A
ZeVAuto	CDL6100RBEV	BEV	238	308	46	N/A
BYD	C9	BEV	365	240	40	N/A

Dado los alcances del proyecto, los costos de capital y operativos asociados a camiones y buses de hidrógeno y baterías fueron estimados en base a otros estudios realizados anteriormente en la materia y se presentan en la **Tabla 11**. Por una parte, el precio de los camiones de hidrógeno se calculó en función de la potencia de la celda de combustible y el de los camiones a batería, en función de la capacidad de su batería. Por otra parte, el costo de los buses para ambas tecnologías se calculó en función de su cantidad de asientos para pasajeros.

Tabla 16 Costos de capital y operativos para camiones y buses FCEV y BEV

Tecnología	Vehículo	Costo	Unidad	Tipo costo	Referencia
FCEV	Camión	1.150	USD/kW_{FC}	CAPEX	[31]
	Bus	20.823	USD/pasajero	CAPEX	[12]
	Reemplazo celda de combustible	25%	%CAPEX camión/bus	CAPEX	[31]
	Reemplazo batería	324	USD/kWh	CAPEX	[31]
	O&M preventivo	0.49	USD/km	OPEX	[31]
BEV	Camión	700	USD/$kWh_{batería}$	CAPEX	[31]
	Bus	15.796	USD/pasajero	CAPEX	[12]
	Reemplazo batería	324	USD/kWh	CAPEX	[31]
	O&M preventivo	0.25	USD/km	OPEX	[31]

Rutas y sus características

Se definieron dos tipos de recorrido por país: uno corto (entre 50 y 200 km) y otro largo (mayor a 200 km). Ambas rutas se incluyeron para la evaluación de camiones y de buses de hidrógeno y baterías, dada la falta de consenso sobre cuál es la distancia óptima para este tipo de vehículos.

Cada ruta fue caracterizada con variables técnicas y económicas: distancia, peajes, tarifas de transporte (para buses), orientación geográfica, dirección y velocidad del viento predominante, y pendiente.

Los *ángulos de las rutas* se calcularon con herramientas como Movable Type Azimuth Calculator y los datos meteorológicos se obtuvieron desde Windfinder o estaciones locales.

La *distancia total* para cada recorrido se consideró como igual en ambos sentidos (ida y vuelta), incluso en los casos donde se utilizan trayectos distintos por disponibilidad de carreteras. Esta simplificación permite estandarizar los cálculos sin afectar la comparabilidad entre escenarios.

Los *costos de peaje* fueron obtenidos, cuando fue posible, desde plataformas nacionales oficiales como la Dirección General de Concesiones (Chile), AUBASA (Argentina), Telepeaje (Uruguay), entre otras. En ausencia de datos específicos, se estimaron en función del número de casetas por ruta y el valor promedio de peaje por eje o vehículo liviano. En el caso de buses, las tarifas de transporte se calcularon a partir del valor comercial del pasaje para cada trayecto, consultado en plataformas de venta de boletos.

Para caracterizar el *efecto del viento*, se consideró la orientación de la ruta y la dirección predominante del viento en un año meteorológico típico (TMY). La dirección de la ruta se calculó como un azimut geográfico entre las coordenadas GPS de origen y destino, utilizando herramientas como Movable Type Azimuth Calculator. Por ejemplo:

- Santiago (33.45°S, 70.66°W) – Viña del Mar (33.02°S, 71.55°W): azimut de 299.7°
- Bogotá (4.71°N, 74.1°W) – Bucaramanga (7.12°N, 73.12°W): azimut de 39.8°

La *dirección y velocidad promedio del viento* se estimaron a partir de datos históricos de la plataforma Windfinder. En ciudades sin información disponible, se recurrió a informes anuales de estaciones meteorológicas locales. Estos valores se utilizaron para ajustar el consumo energético proyectado en función de la resistencia aerodinámica.

Las rutas y sus variables se detallan en la **Tabla** 17 y **Tabla** 18, respectivamente.

Tabla 17 Rutas consideradas en las simulaciones

País	Recorrido	Salida - Destino	Ruta utilizada
Chile	Corto	Santiago – Viña del mar	Ruta 68
	Largo	Santiago – Temuco	Ruta 5 sur
Argentina	Corto	Buenos Aires – La Plata	Ruta 9
	Largo	Buenos Aires – Córdoba	Ruta Nacional 9 y 19
Uruguay	Corto	Montevideo – Punta del Este	Ruta Interbalnearia
	Largo	Montevideo – Rivera	Ruta 5
Colombia	Corto	Bogotá – Tunja	Autopista Norte
	Largo	Bogotá – Medellín	Ruta Nacional 45A
Costa Rica	Corto	San José – Cartago	Ruta 32
	Largo	San José – Liberia	Ruta Nacional 1
México	Corto	CDMX – Puebla	Carretera 57D
	Largo	CDMX – Guadalajara	Autopista México-Guadalajara

Tabla 18 Variables consideradas en las herramientas de simulación

Ruta utilizada	Distancia (km)	Peaje (USD)	Tarifa[3] (USD)	Angulo ruta ida y viento (°)	Angulo ruta vuelta y viento (°)	Velocidad promedio viento (km/h)	Pendiente promedio de ruta (°)
Ruta 68	120	6.6	6	90	90	20	0.260
Ruta 5 sur	670	27	18	0	180	8.5	-0.039
Ruta 9	60	15	3	45	135	23	-0.004
Ruta Nacional 9 y 19	710	9.9	17	115	65	20	0.030
Ruta Interbalnearia	140	18.7	11.2	0	180	25	-0.010
Ruta 5	520	25	39.7	90	90	23	0.021
Autopista Norte	146	19.3	3	45	135	15	0.229
Ruta Nacional 45A	420	53	17	160	20	10	-0.157
Ruta 32	25	9	2	0	180	15	0.230
Ruta Nacional 1	215	32	12	135	45	25	-0.274
Carretera 57D	135	23.3	15	45	135	6	-0.052
Autopista México-Guadalajara	550	159	35	20	160	7	-0.084

Variables asociadas al país

*Se incorporaron parámetros económicos específicos por país: salario mínimo, tasa de importación, IVA, seguros (responsabilidad civil, carga e integral) y costo de electricidad. Todos los valores monetarios fueron convertidos a USD según el tipo de cambio vigente al 12 de junio de 2025. Esta información se presenta en la **Tabla** 19*
Tabla 19. Esta información fue obtenida desde fuentes públicas, como reportes y noticiarios actualizados de cada uno de los países de la Red RH2.

Tabla 19 Parámetros económicos asociados a los países de la Red RH2

Parámetro	Chile	Argentina	Uruguay	Colombia	Costa Rica	México
Salario mínimo (USD) [124]	542	276	555	323	725	303
Arancel de importación (%) [125]	6%	20%	10.1%	5%	5.6%	15%
IVA (%) [126]	19%	21%	22%	19%	13%	16%
Seguro responsabilidad civil (USD/año)	300	600	600	150	185	300
Seguro de carga (USD/año) [127]	1 500	1 400	900	1 750	1 100	2 000
Seguro integral (USD/año) [127]	3 000	2 500	3 000	4 500	3 500	4 250

[3] Solo utilizable para la simulación de casos de buses

Costo electricidad (USD/kWh) [128]	0.20	0.26	0.12	0.13	0.18	0.22
Valor del dólar en divisa Local (1 USD) [129]	938.5 CLP	118.7 ARS	4194.6 COP	41.4 UYU	508.3 CRC	19.1 MXN

5.2.2 Inputs de simulación

En la hoja de *Inputs de simulación*, el usuario puede configurar libremente los parámetros del proyecto:

- **Selección del país y tipo de ruta**: corta o larga, para camiones o buses.
- **Selección del modelo de vehículo**: camión o bus, para ambas tecnologías.
- **Parámetros generales del proyecto:** duración, tiempo en garita, días operativos por mes, tasa de descuento, cantidad de carga transportada (camiones), tarifas por servicios renovables y decrecimiento proyectado de los precios de electricidad e hidrógeno.
- **Criterios específicos de operación:** carga transportada (en camiones), número de pasajeros (en buses), y número de unidades requeridas.
- **Costos y subsidios:**
  - El CAPEX del vehículo se estima en función de la potencia del motor eléctrico.
  - El costo del hidrógeno y de la electricidad se calculan proporcionales a cantidad consumida en cada recorrido y corresponden al valor del producto en la estación de carga, no al de producción.
  - Los costos de mantenimiento se basan en las millas recorridas por el vehículo.
  - Se incluyen subsidios al CAPEX, al precio del H_2 y reducciones arancelarias aplicables a la importación de tecnología.

Para facilitar el ingreso de datos, se ofrecen rangos de referencia por ítem, permitiendo al usuario realizar simulaciones aún sin conocimientos técnicos detallados.

5.2.3 Resultados de simulación

En la tercera hoja se presentan los resultados organizados en secciones clave:

- **Detalles de operación**: consumo energético (hidrógeno/electricidad), número de recargas por trayecto, duración total del viaje, y resumen mensual y anual de la operación.
- **Desglose de costos**: inversiones iniciales (CAPEX), costos operativos (OPEX), incluyendo mantenimiento, peajes, salarios y seguros.
- **Flujo de caja**: ingresos y egresos anuales durante todo el horizonte del proyecto. Se calcula el Valor Actual Neto (VAN) actualizado por año.
- **Comparación de tecnologías**: resumen de CAPEX, OPEX y TCO para ambas tecnologías. En el caso de camiones, se indica también la cantidad necesaria para cubrir la demanda de carga anual.
- **Gráficos**: se generan automáticamente visualizaciones que muestran:
  - Distribución de costos por tecnología
  - Evolución del VAN en el tiempo
  - Proyección de precios energéticos
  - Carga o pasajeros transportados
  - Número de estaciones de carga necesarias
  - Tiempos de operación por viaje

5.3 Modelo matemático de las herramientas de simulación

5.3.1 Ajuste de autonomía

Para adaptar la autonomía nominal de cada modelo de bus o camión a las condiciones reales de las rutas evaluadas, se implementó un modelo de corrección basado en un coeficiente de rendimiento (COP), que depende de la velocidad del viento (V_{viento})y la pendiente del trayecto ($\theta_{pendiente}$):

$$A = A_0 \cdot COP\left(V_{viento}, \theta_{pendiente}\right)$$

Donde A es la autonomía ajustada y A_0 la autonomía nominal. El COP se define como la razón entre el consumo nominal ($C_{nominal}$) y el consumo local de energía (C_{local}):

$$COP = \frac{C_{nominal}}{C_{local}\left(V_{viento}, \theta_{pendiente}\right)}$$

Dado que la información sobre consumo energético de los vehículos no siempre está disponible, ambos consumos se estimaron teóricamente con la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{2} C_d \rho A_f V_{rel}^3 + \mu \cdot mgVcos(\theta) + mgsin(\theta)$$

Donde:

- C_d: coeficiente de arrastre aerodinámico
- ρ: densidad del aire
- A_f: área frontal del vehículo
- V_{rel}: velocidad relativa promedio
- μ: coeficiente de fricción por rodadura
- m: masa del vehículo
- g: aceleración de la gravedad
- θ: pendiente de la ruta

El primer término representa la energía necesaria para superar la resistencia aerodinámica, donde la velocidad relativa se calcula respecto a la velocidad de roce (V_{roce}):

$$V_{rel} = V - V_{roce}$$

Y la V_{roce} se calcula como:

$$V_{roce} = V_{viento} \cdot \cos(\varphi)$$

Donde V_{viento} representa la velocidad del viento y φ el ángulo entre ruta y viento, con ambos parámetros cuantificados para cada ruta en la **Tabla** 18**.**

Para calcular el **consumo nominal**, se asumió V_{viento}=0. En el caso del **consumo local**, se utilizaron los valores reales de viento y orientación de ruta.

5.3.2 Pronóstico de costos de hidrógeno y electricidad

En las herramientas de simulación se consideró una evolución variable del costo del hidrógeno y la electricidad a lo largo del horizonte de evaluación del proyecto. Esta variación se modeló mediante funciones exponenciales decrecientes, tomando como punto de partida los precios estimados al año de inicio del proyecto. Los parámetros fueron ajustados con base en estudios recientes sobre el desarrollo de las industrias de energías renovables e hidrógeno [130].

Para el caso del hidrógeno, el modelo utilizado fue:

$$P_{H_2}(t) = P_{H_2,inicial} \cdot e^{-k_1(t-t_0)}$$

Y en el caso de la electricidad:

$$P_{elec}(t) = P_{elect,inicial} \cdot e^{-k_2(t-t_0)}$$

Donde:

$P_{H2,inicial}$ y $P_{elec,\ inicial}$: costos iniciales del hidrógeno y la electricidad respectivamente.
k_1 y k_2: tasas de decrecimiento anual de cada energético.
t: año del horizonte evaluado.
t_0: año de inicio del proyecto.

Estos modelos permiten incorporar tendencias proyectadas de precios en los cálculos financieros, reflejando así la evolución esperada de los costos operativos energéticos.

6. Casos de estudio

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante la aplicación de las herramientas de simulación descritas anteriormente. Para ello, se definieron tres casos de análisis que evalúan distintos escenarios de implementación de tecnologías de transporte basadas en BEV y FCEV. Cada caso corresponde a un proyecto específico con características particulares, y su análisis comparativo considera aspectos técnicos, económicos y operativos. El objetivo es identificar las ventajas y desventajas relativas de cada alternativa tecnológica según las condiciones del entorno y los requerimientos del proyecto.

El primer caso compara el desempeño económico de camiones impulsados por hidrógeno y por baterías frente a sus equivalentes diésel. Se calcula el costo máximo de compra del hidrógeno que permitiría igualar el rendimiento económico de un camión FCEV con uno diésel. Este análisis se enfoca en el rendimiento del tren motriz, por lo que se eligió un caso de camiones, dado que presentan mayor variabilidad en la carga transportada. No se consideró un caso análogo con buses, ya que factores como confort, climatización y diseño pueden influir en los costos y podrían sesgar la comparación con el diésel.

El segundo caso compara el rendimiento operativo y económico de camiones y buses FCEV y BEV en trayectos de distinta longitud: cortas (50 a 200 km) para buses y largas (más de 200 km) para camiones. El caso de camiones se contextualiza en el transporte de carga en Chile, y el de buses en Colombia. Se analizan parámetros clave como recarga en ruta, tiempos de viaje, carga útil anual (camiones), pasajeros transportados anualmente (buses), costos de inversión y operación, y flujos financieros (ingresos, egresos, valor actual neto –VAN– y costo total de propiedad –TCO–).

En el tercer caso, se realiza un análisis holístico comparando el VAN de un camión y un bus en todos los países considerados. Se varían sistemáticamente parámetros como subvenciones al CAPEX, al costo del energético y al arancel de importación, así como tarifas de cobro (transporte de carga y boletos de pasajeros) y tasas de reducción de los costos de hidrógeno y electricidad, con el fin de identificar escenarios de viabilidad económica.

Las rutas seleccionadas corresponden a trayectos usuales para el tráfico de carga y pasajeros, lo que permite evaluar el desempeño en escenarios representativos y de interés operativo. Esta elección aporta realismo al análisis, al considerar condiciones reales como velocidad del viento e inclinación del terreno, que afectan el consumo energético. No obstante, una comparación directa entre rutas con distintas características puede generar sesgos y conclusiones poco representativas si no se contextualiza adecuadamente.

Por esta razón, en los primeros dos casos de estudio se utiliza una única ruta para asegurar la comparabilidad, centrándose en las diferencias propias de cada tecnología y sus costos asociados. En el tercer caso, se incorporan distintas rutas por país, dado que el análisis se orienta a las condiciones técnicas y económicas nacionales como integradoras de proyectos de electromovilidad. Aun así, se seleccionaron rutas con características similares para minimizar diferencias contextuales.

6.1 Caso 1: Comparación con tecnologías de diésel

En esta sección se analiza el rendimiento económico del transporte sostenible (FCEV y BEV) a través del indicador de costo por kilómetro recorrido (USD/km), considerando los costos capitales y operativos del primer año del proyecto. Esta aproximación permite una comparación directa con vehículos diésel en una evaluación económica actual, excluyendo factores como depreciación y reemplazo de componentes mayores.

La ruta seleccionada es el trayecto Santiago–Temuco (Chile), uno de los más transitados debido al intercambio de bienes agrícolas, forestales y comerciales entre la capital y el sur del país. La información específica de esta ruta y los parámetros operativos aplicables se presentan en la **Tabla** *20* y **Tabla** *21*.

Tabla 20 Datos de ruta Santiago - Temuco

Ítem	Valor	Unidad
Salida - Destino	Santiago - Temuco	-
Velocidad del viento	8.5	km/h
Distancia (IDA)	670	km
Dirección predominante del viento	180	°
Pendiente promedio	-0.039	°
Costo de peajes en ruta	27.1	USD

Tabla 21 Parámetros generales y criterios de operación para camiones y buses FCEV y BEV

Parámetros generales y criterios de operación	Valor	Unidad
Duración del proyecto	20	años
Carga a transportar anualmente[4]	100 000	ton/año
Días operativos al mes	25	días/mes
Tasa de descuento	8%	%
Tasa de decrecimiento del costo de electricidad	2.5%	%/año
Tasa de decrecimiento del costo del hidrógeno	2.5%	%/año
Tarifa extra por servicio renovable (BEV)	0%	% del costo del pasaje
Tarifa extra por servicio renovable (FCEV)	0%	% del costo del pasaje
Tarifa pasajeros[4]	18	USD
Tarifa de transporte de carga[5]	1.79	USD/milla
Tiempo en garita	120	min
Horas operativas del bus[4]	20	h/día

[4] Variable válida exclusivamente para simulación de buses
[5] Variable válida exclusivamente para simulación de camiones

Costo del hidrógeno	5	USD/kg
Costo de la electricidad	0.20	USD/kWh

Se simularon dos modelos de camión con capacidades similares: el Hyzon HYHD8-200 (FCEV) y el Volvo FH Electric (BEV). Sus especificaciones técnicas se resumen en la **Tabla 22**.

Tabla 22 Caracterización técnica de camiones de hidrógeno y batería utilizados en el Caso 1

Parámetro	Hyzon Motors HYHD8-200 (FCEV)	Volvo FH Electric (BEV)	Unidad
Potencia Celda de Combustible	200	N/A	-
Potencia Motor Eléctrico	450	490	kW
Batería	110	540	kWh
Tanque H2	50	N/A	-
Carga útil	30.2	29	ton
Tiempo de recarga	15	150	min
Velocidad máxima	90	90	km/h
Autonomía nominal	563	345	km
COP - ida	0.95	0.96	-
COP - vuelta	1.04	1.03	-
Autonomía en ruta - ida	536	331	km
Autonomía en ruta - vuelta	618	357	km

Las condiciones de ruta afectan el rendimiento: en la ida, una pendiente positiva y viento desfavorable reducen la autonomía (–5 % FCEV, –6 % BEV), mientras que en la vuelta las condiciones son favorables, aumentando la eficiencia.

Resultados operacionales – Primer año

Tabla 23 Resultados operacionales en el primer año del proyecto

Ítem	FCEV	BEV	Unidad
Carga transportada por camión	9 785	7 656	ton
Hidrógeno requerido	70 912	N/A	kg
Electricidad requerida	N/A	1 042 533	kWh
Distancia recorrida	434 160	353 760	km

Como se aprecia de la **Tabla** 23, el camión FCEV transportó una mayor carga útil durante la simulación, lo que se debe a que recorrió una mayor distancia gracias a su mayor autonomía. Esta ventaja le permite operar con menos detenciones, en contraste con el BEV, que necesita recargas más frecuentes y

prolongadas, limitando su disponibilidad. Aunque ambos modelos tienen una capacidad de carga útil similar, el FCEV presenta una ventaja significativa en términos operativos.

Costos – Primer año

Pese a su mayor madurez tecnológica, el camión BEV tiene un costo inicial superior, en gran parte por el tamaño de su batería. En contraste, el FCEV logra autonomías similares con menor volumen y costo inicial, aunque enfrenta costos energéticos más altos: el hidrógeno es un 70 % más caro que la electricidad, compensando en parte su ventaja operativa (ver **Tabla** 24).

Tabla 24 Desglose de costos para ambas tecnologías

Costo	FCEV	BEV	Unidad	Tipo de costo
Camión	243 800	400 680	USD	CAPEX
Combustible (H2)	421 928	N/A	USD/año	OPEX
Electricidad	N/A	248 123	USD/año	OPEX
O&M preventivo	67 389	49 419	USD/año	OPEX
Peajes	17 534	14 287	USD/año	OPEX
Salario conductores	72 167	71 440	USD/año	OPEX
Seguros	5 712	5 712	USD/año	OPEX

Rendimiento económico

El factor de rendimiento económico (F) se calcula como:

$$F = \frac{\sum costos}{Distancia\ recorrida}\left[\frac{USD}{km}\right]$$

El camión FCEV muestra un mejor desempeño económico (F=1.93 USD/km) frente al BEV (F=2.26 USD/km), gracias a su menor costo de adquisición y mayor distancia recorrida. Para igualar el rendimiento económico del diésel (F = 1.21 [50]), el precio del hidrógeno debería reducirse a 1.35 USD/kg, o bien requerir una subvención de 3.65 USD/kg respecto al valor actual de 5 USD/kg.

6.2 Caso 2: Comparación de desempeño FCEV y BEV

Este segundo caso analiza la viabilidad comparativa entre camiones y buses impulsados por hidrógeno (FCEV) y baterías (BEV), considerando un horizonte de 20 años y calculando el TCO y VAN de cada alternativa.

6.2.1 Camiones

La evaluación de camiones FCEV y BEV se basa en el primer caso de análisis, manteniendo constantes la ruta, los modelos de vehículos, sus características técnicas y los costos asociados. Esto permite una comparación más clara entre ambas tecnologías.

A partir de la simulación previa, se obtuvo información sobre el tiempo necesario para completar el circuito (ida y vuelta) y la cantidad de estaciones de recarga requeridas para cada tecnología (1 para

FCEV y 2 para BEV). La **Figura 13** muestra que la mayor autonomía del camión a hidrógeno, junto con su menor tiempo de recarga, reduce el tiempo total del recorrido. Esto se traduce en una mayor capacidad operativa anual, lo que permite transportar la misma carga útil con una flota menor respecto a los BEV.

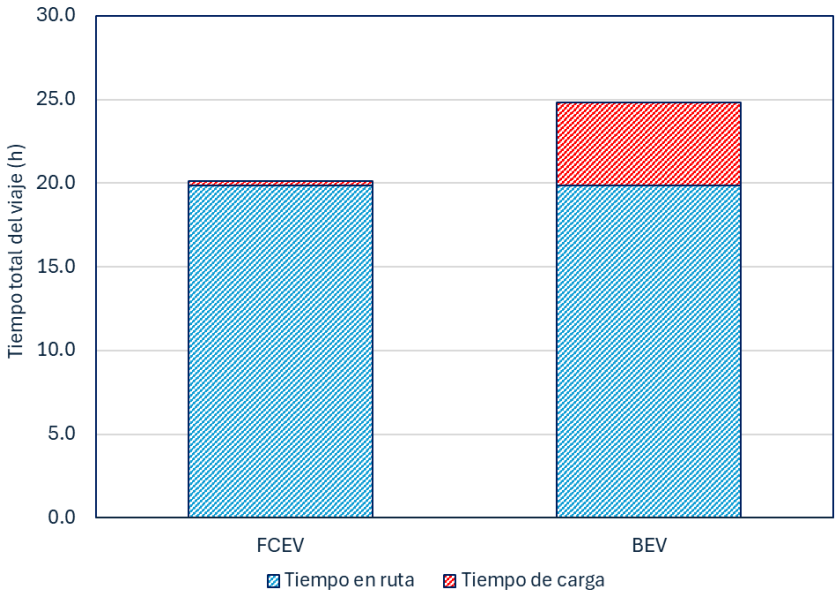

Figura 13 Tiempo en que demora un circuito (ida y vuelta)

Para cumplir con el objetivo de transporte de carga (**Tabla** 25), se requieren 11 camiones FCEV y 14 BEV. Esta diferencia se debe a la autonomía operativa de cada tecnología. Con estos datos, se calcula el Costo Total de Propiedad (TCO), utilizando los siguientes flujos de caja:

$$TCO = \sum_{t=1}^{20} \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}$$

Donde:

- t = año de evaluación
- r = tasa de descuento (%)

Tabla 25 Resumen económico de tecnologías – Caso de camiones

	FCEV	BEV	Unidad
Número de camiones	11	14	-
CAPEX	4 807 587	10 513 440	USD
OPEX	60 554 528	52 082 653	USD
TCO	65 362 114	62 596 093	USD

El cálculo considera los costos de inversión inicial (año 0) y los reemplazos programados de componentes críticos como baterías y celdas de combustible. Los desgloses del TCO para el horizonte de los proyectos de camiones FCEV y BEV se presentan en la **Figura 14** y **Figura 15**, respectivamente.

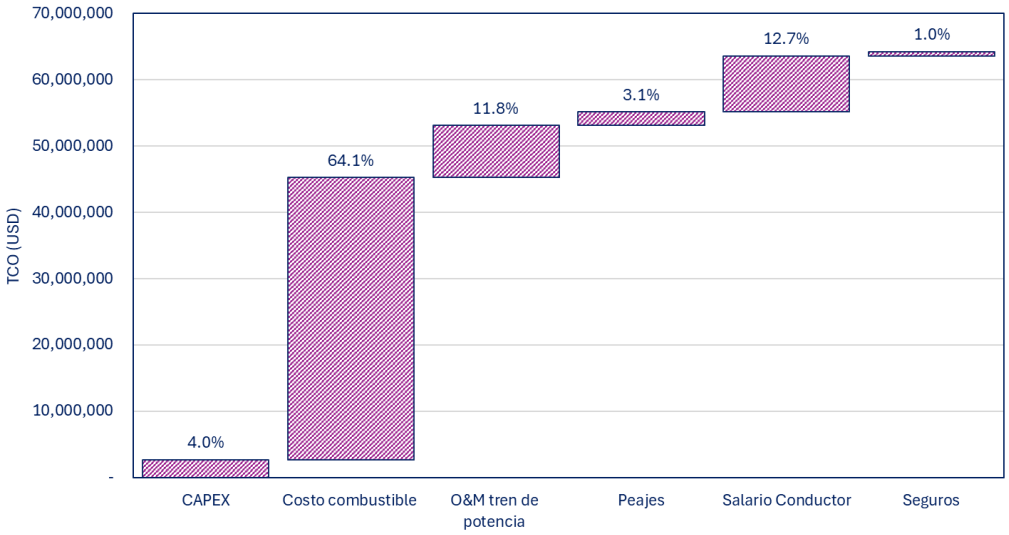

Figura 14 Desglose del TCO para camión FCEV

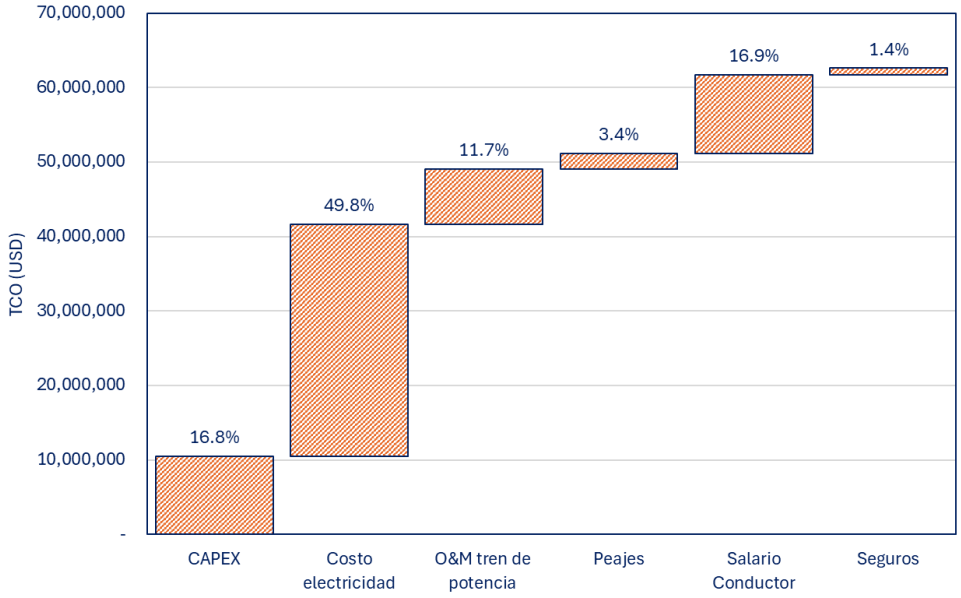

Figura 15 Desglose del TCO para camión BEV

El combustible representa la mayor parte del TCO en ambas tecnologías: un 64.1 % en el caso del FCEV y un 49.8 % en el BEV. En FCEV, el mantenimiento preventivo del tren motriz supera incluso el CAPEX debido al alto kilometraje y a los elevados costos de estas tecnologías emergentes. En el caso de BEV, el costo de capital es significativo debido a la necesidad de reemplazar baterías en los años 8 y 16.

Para el cálculo del VAN se emplea la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{t=1}^{20} \frac{R_t - (CAPEX_t + OPEX_t)}{(1+r)^t}$$

Donde:

- R_t = ingresos generados por el transporte de carga/pasajeros en el año t (USD/año)
- t = año de evaluación
- r = tasa de descuento (%)

En la **Figura 16**, se presenta la evolución del VAN del proyecto de camión FCEV y BEV. Aunque el proyecto BEV muestra una ligera ventaja en el VAN, ambos presentan valores negativos durante todo el horizonte de evaluación. Esto indica que los ingresos no cubren los costos totales, incluso considerando una disminución progresiva en el precio del hidrógeno y la electricidad. En los primeros ocho años, el VAN de los camiones BEV se mantiene prácticamente constante, y luego aumenta de forma moderada. Esto refleja el equilibrio entre ingresos operacionales y los costos de inversión y reposición de componentes.

En resumen, sin subvenciones al CAPEX, al energético o a los aranceles de importación, ninguno de los proyectos resulta económicamente viable bajo los precios actuales de tecnologías y combustibles.

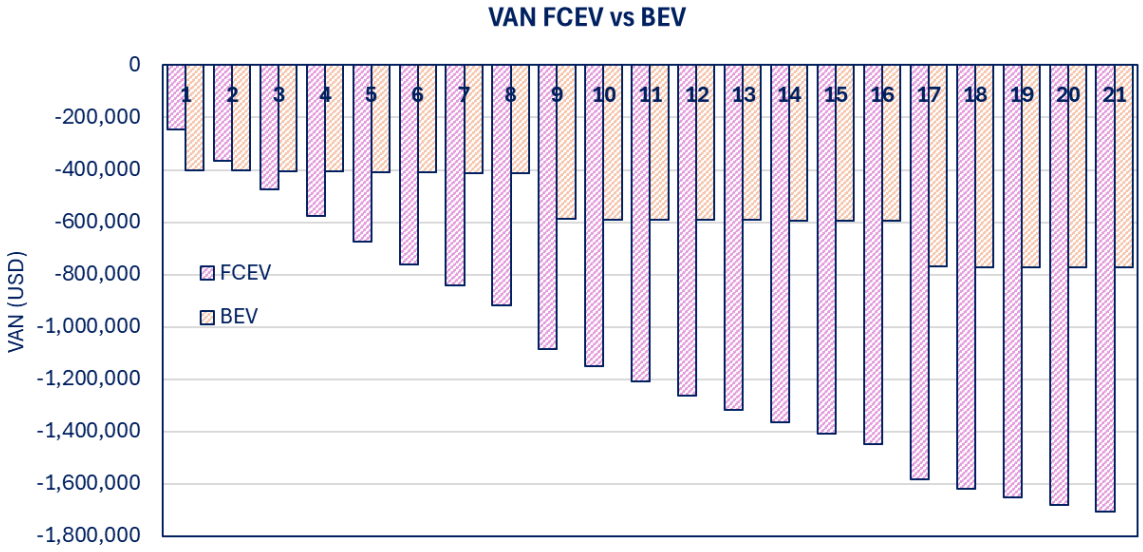

Figura 16 Comparación de VAN de proyectos de camiones FCEV y BEV

6.2.2 Buses

Para el análisis de buses se seleccionaron modelos FCEV y BEV con especificaciones similares en potencia de motor y número de asientos, parámetros clave que afectan ingresos y costos. Se eligieron los modelos Iveco E–Way H2 (FCEV) y BYD–C9 (BEV). Los parámetros técnicos se presentan en la **Tabla** 26, dando cuenta que ambos modelos presentan una desviación menor al 10 % respecto a su autonomía nominal- dada la necesidad de recarga del energético-, lo que podría influir levemente en los tiempos de recorrido.

Tabla 26 Parámetros técnicos FCEV y BEV

Parámetro	IVECO E-WayH2	BYD C9	Unidad
Potencia Celda de Combustible	130	N/A	-
Potencia Motor Eléctrico	310	490	kW
Batería	69	540	kWh
Tanque H2	31.2	N/A	-
Cantidad de asientos	40	40	-

Tiempo de recarga	15	120	min
Velocidad máxima	100	100	km/h
Autonomía nominal	450	240	km
COP - ida	0.93	0.93	-
COP - vuelta	1.09	1.07	-
Autonomía en ruta - ida	416	224	km
Autonomía en ruta - vuelta	489	258	km

La simulación se contextualizó en Colombia, entre Bogotá y Tunja, ruta con flujo de buses interurbanos al ser entre la capital y un centro universitario, administrativo y comercial. Las condiciones de operación se resumen en la **Tabla** 27.

Tabla 27 Condiciones de ruta Bogotá - Tunja

Ítem	Valor	Unidad
Salida - Destino	Bogotá - Tunja	-
Velocidad del viento	4.3	km/h
Distancia (IDA)	146	km
Dirección predominante del viento	135	°
Pendiente promedio	0.098	°
Costo de peajes en ruta	19.3	USD
Tarifa del pasaje	6	USD

Como la distancia de la ruta está dentro de los rangos de autonomía, no se requieren recargas intermedias. Por tanto, ambos proyectos consideran tiempos similares de operación y volumen de pasajeros transportados.

Considerando los mismos valores de parámetros generales y criterios de operación del caso de buses presentados anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados de simulación para el primer año.

Tabla 28 Resultados de simulación en el primer año del proyecto

Ítem	FCEV	BEV	Unidad
Pasajeros transportados	97 920	97 920	-
Hidrógeno requerido	46 463	N/A	kg
Electricidad requerida	N/A	1 019 175	kWh
Distancia recorrida	357 408	357 408	km

Debido a que no existe la necesidad de recarga en ruta, no hay diferencia en el tiempo de traslado ni en la frecuencia de transporte de pasajeros. En consecuencia, los ingresos por transporte son iguales, radicando la diferencia económica en los costos operativos y de inversión.

En la **Tabla** 29, se presenta el desglose de costos para buses. Tanto CAPEX como OPEX de FCEV son mayores que BEV, lo que resulta en menor rendimiento económico.

Tabla 29 Desglose de costos de buses FCEV y BEV al primer año del proyecto

Costo	FCEV	BEV	Unidad	Tipo de costo
Bus	874 558	663 437	USD	CAPEX
Reemplazo celda de combustible	218 640	N/A	USD/año	OPEX
Reemplazo de batería	22 379	118 382	USD/año	OPEX
Combustible (H_2)	276 456	N/A	USD/año	OPEX
Electricidad	N/A	157 666	USD/año	OPEX
O&M preventivo	55 476	49 928	USD/año	OPEX
Peajes	47 272	47 272	USD/año	OPEX
Salario conductores	35 971	35 971	USD/año	OPEX
Seguros	7 616	7 616	USD/año	OPEX

A partir del flujo de caja del proyecto, la **Tabla 30** muestra un TCO un 29 % menor para BEV respecto a FCEV. Además, el TCO de ambos buses es menor que el de los camiones, ya que el análisis de carga considera una flota completa, mientras que en el caso de buses se evalúa el desempeño de una sola unidad.

En la **Figura 17** y **Figura** 18 se presenta el desglose del TCO para FCEV y BEV, respectivamente. Se observa una distribución similar a la observada en el caso camiones donde el costo del energético es el principal, pero con mayor influencia del CAPEX.

Tabla 30 Resumen de tecnologías – Caso de buses

	FCEV	BEV	Unidad
Número de buses	1	1	-
CAPEX	1 356 595	900 200	USD
OPEX	3 942 696	2 907 711	USD
TCO	5 299 291	3 807 911	USD

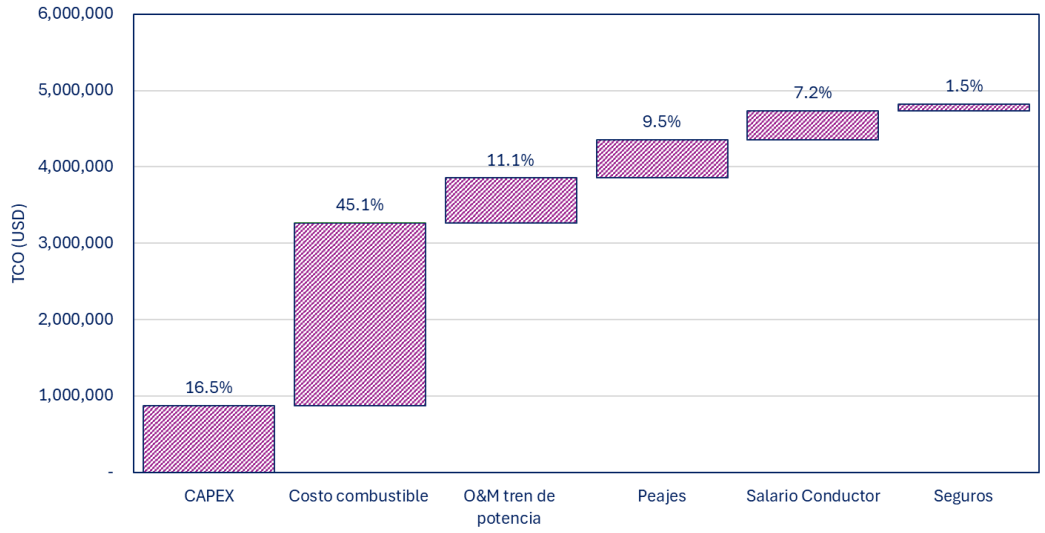

Figura 17 Desglose del TCO para bus FCEV

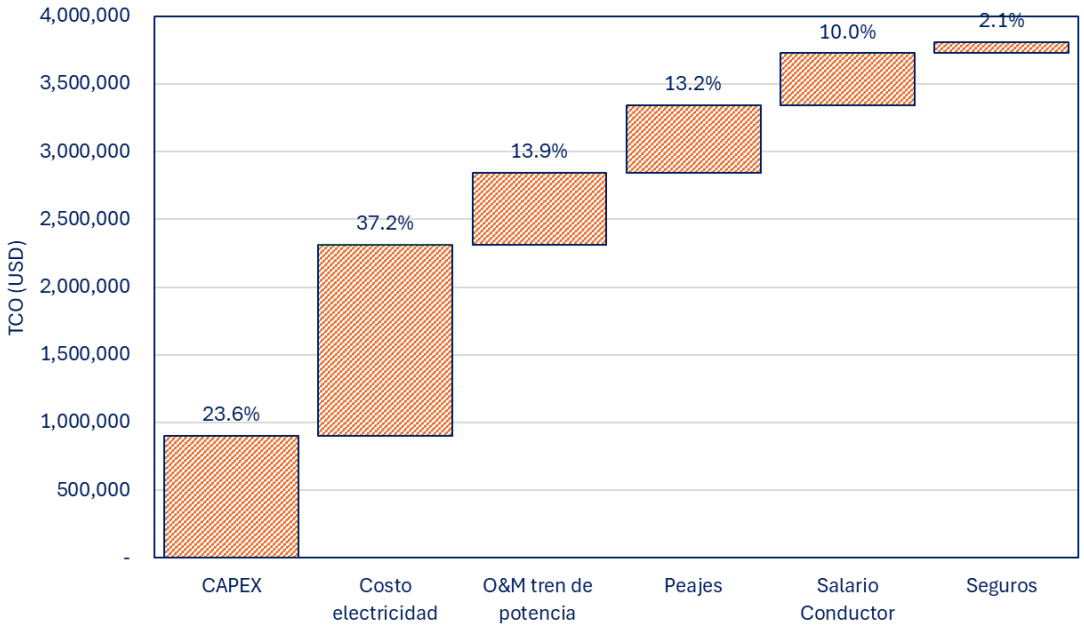

Figura 18 Desglose del TCO para bus FCEV

La **Figura 19** muestra la evolución del VAN para ambos proyectos. El bus FCEV recupera su inversión en el octavo año, aunque presenta una caída en el noveno por los reemplazos programados de componentes clave, como la celda de combustible y las baterías. Aun así, mantiene una tendencia positiva sostenida hacia el final del período siempre que se planifiquen adecuadamente los ciclos de reinversión.

En contraste, el bus BEV alcanza el punto de equilibrio financiero en el cuarto año y mantiene un crecimiento continuo del VAN. Esto se debe a menores requerimientos de mantenimiento y reemplazos en los primeros años de operación.

Ambos proyectos son económicamente viables sin necesidad de subsidios ni aumentos tarifarios, lo que confirma su competitividad frente a tecnologías convencionales. No obstante, sus perfiles financieros difieren: el BEV ofrece retornos más tempranos, mientras que el FCEV requiere mayor planificación de reinversiones.

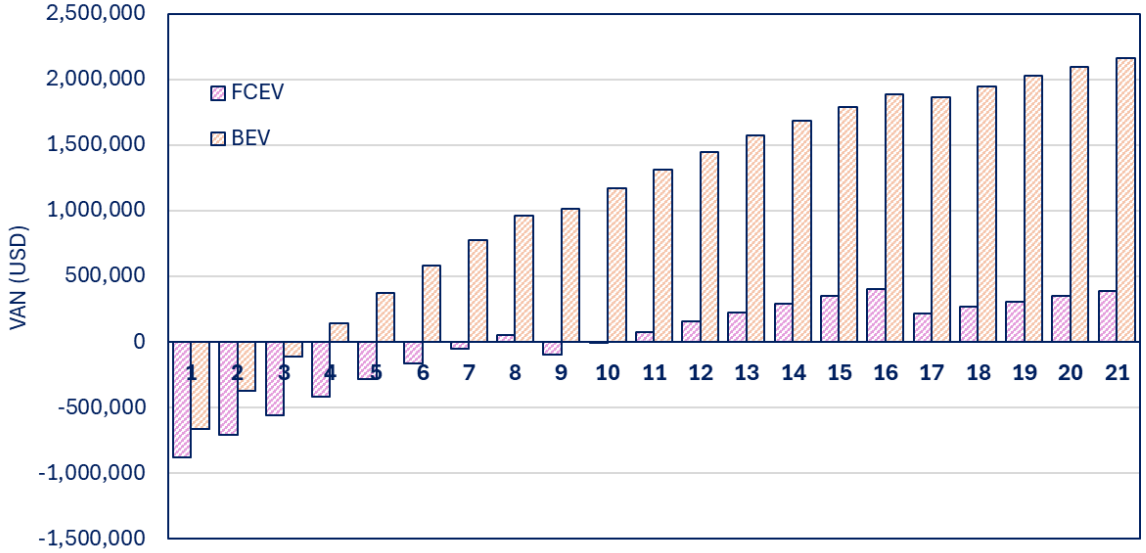

Figura 19 VAN de proyectos de buses FCEV y BEV

En las **Tabla 31** y **Tabla 32** se presenta el resumen de los parámetros operativos de los casos de análisis para todos los países pertenecientes a la Red de Aprendizaje.

Tabla 31: Comparativa de buses FCEV y BEV en ruta corta para los países de la Red.

Comparativa BUSES a H2 para los países de la Red, ruta corta	unidad	CHILE		COLOMBIA		MEXICO		URUGUAY		COSTA RICA		ARGENTINA	
		FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV
Datos de ruta													
Salida-destino		SANTIAGO-VIÑA DEL MAR		BOGOTÁ - TUNJA		CDMX - PUEBLA		MONTEVIDEO-PUNTA DEL		SAN JOSÉ-CARTAGO		BUENOS AIRES-LA PLATA	
Velocidad del viento	km/h	20		4.3		6		25		15		23	
Distacia (IDA)	km	120		146		135		140		25		60	
Direccion predominante del viento	°	180		135		90		90		90		90	
Pendiente promedio	°	(-) 0.260		(+) 0.098		(-) 0.035		(-) 0.001		(+) 0.230		(-) 0.004	
Costos de peajes en ruta	USD	6,6		19.3		23,3		18,7		9,0		15,0	
Tarifa del pasaje	USD	6,0		6,0		7,4		11,2		2,0		4,0	
Resultados operacionales al primer año													
Pasajeros transportados		114 240	114 240	97 920	97 920	103 680	103 680	100 800	100 800	288 000	288 000	184 320	184 320
Hidrógeno requerido	kg	44 611	N/A	46 463	N/A	45 545	N/A	47 808	N/A	23 757	N/A	36 587	N/A
Electricidad requerida	kWh	N/A	978 632	N/A	1 019 175	N/A	999 119	N/A	1 051 568	N/A	521 644	N/A	803 502
Distancia recorrida	km	342 720	343 720	357 408	357 408	349 920	349 920	352 800	352 800	180 000	180 000	276 480	276 480
Tiempo de circuito	h	4,2	4,2	4,9	4,9	4,6	4,6	4,7	4,7	1,7	1,7	2,6	2,6
Cantidad de estaciones de recarga		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cantidad de vehiculos requeridos		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Desglose de costos													
Bus	USD	882 887	669 755	874 558	663 437	957 849	726 621	917 037	695 661	879 556	667 228	999 495	758 213
Reemplazo celda de combustible	USD/año	220 722	N/A	218 640	N/A	239 462	N/A	229 259	N/A	219 889	N/A	249 874	N/A
Reemplazo de batería	USD/año	22 379	118 382	22 379	118 382	22 379	118 382	22 379	118 382	22 379	118 382	22 379	118 382
Combustible	USD/año	265 435	N/A	276 456	N/A	264 162	N/A	291 632	N/A	134 228	N/A	221 353	N/A
Electricidad	USD/año	N/A	232 914	N/A	157 666	N/A	254 975	N/A	153 950	N/A	106 102	N/A	252 782
O&M Preventivo	USD/año	53 196	47 876	55 476	49 928	52 944	47 650	56 141	50 527	26 530	23 877	43 636	39 272
Peajes	USD/año	18 785	18 785	47 272	47 272	60 412	60 412	47 124	47 124	64 800	64 800	69 254	69 254
Salario conductores		60 443	60 443	35 971	35 971	32 740	32 740	63 097	63 097	76 805	76 805	31 259	31 259
Seguros	USD/kg	5 712	5 712	7 616	7 616	7 598	7 598	5 490	5 490	5 407	5 407	5 445	5 445
Número de buses requeridos		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Resumen economico de tecnologias - caso camiones													
CAPEX	USD	1 369 089	906 519	1 356 595	900 200	1 481 532	963 385	1 420 313	932 424	1 364 091	903 991	1 544 001	994 977
OPEX	USD	3 841 904	3 498 443	3 942 696	2 907 711	3 995 475	3 861 654	4 343 023	3 144 226	3 042 275	2 764 173	3 568 601	3 808 351
TCO	USD	5 210 993	4 404 962	5 299 291	3 807 911	5 477 007	4 825 039	5 854 336	4 076 650	4 406 366	3 668 164	5 112 602	4 803 328
Desglose TCO													
CAPEX	%	16,9%	20,6%	16,5%	23,6%	17,5%	20,0%	15,7%	22,9%	20,0%	24,6%	19,5%	20,7%
Costo combustible	%	45,6%	47,4%	45,1%	37,2%	43,2%	47,4%	44,6%	33,9%	27,3%	26,0%	38,8%	47,2%
O&M Tren de potencia	%	10,8%	11,5%	11,1%	13,9%	10,3%	10,5%	10,2%	13,1%	6,4%	6,9%	9,1%	8,7%
Peajes	%	3,8%	4,5%	9,5%	13,2%	11,7%	13,3%	8,5%	12,3%	15,6%	18,7%	14,4%	15,3%
Salario conductor	%	12,3%	14,5%	7,2%	10,0%	6,3%	7,2%	11,4%	16,4%	18,5%	22,2%	6,5%	6,9%
Seguros	%	1,2%	1,4%	1,5%	2,1%	1,5%	1,7%	1,0%	1,4%	1,3%	1,6%	1,1%	1,2%

Tabla 32: Comparativa de camiones FCEV y BEV en ruta larga para los países de la Red.

Comparativa CAMIONES a H2 para los paises de la Red, ruta larga	unidad	CHILE		COLOMBIA		MEXICO		URUGUAY		COSTA RICA		ARGENTINA	
		FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV	FCEV	BEV
Datos de ruta													
Salida-destino		SANTIAGO-TEMUCO		BOGOTÁ-MEDELLÍN		CDMX-GUADALAJARA		MONTEVIDEO-RIVERA		SAN JOSÉ-LIBERIA		BUENOS AIRES-CORDOBA	
Velocidad del viento	km/h	8.5		10		7		23		25		20	
Distacia (IDA)	km	670		418		550		520		215		710	
Direccion predominante del viento	°	180		330		270		90		90		45	
Pendiente promedio	°	(-) 0.039		(-) 0.157		(-) 0.084		(+) 0.021		(-) 0.273		(+) 0.030	
Costos de peajes en ruta	27.1	27.1		53,0		158,8		25,0		32,0		9,9	
Resultados operacionales al primer año													
Carga transportada por camion	ton	9 785	7 656	14 858	12 180	11 597	9 744	11 959	10 440	25 730	19 140	9 060	7 308
Hidrógeno requerido	kg	70 912	N/A	68 581	N/A	70 509	N/A	68 563	N/A	62 171	N/A	71 234	N/A
Electricidad requerida	kWh	N/A	1 042 533	N/A	1 031 944	N/A	1 087 401	N/A	1 098 783	N/A	847 891	N/A	1 054 508
Distancia recorrida	km	434 160	353 760	411312	351 120	422 400	369 600	411 840	374 400	366 360	283 800	426 000	357 840
Tiempo de circuito	h	19.9	19.9	14,4	16,9	18,5	20,8	17,7	19,9	8,4	10,9	23,3	28
Cantidad de estaciones de recarga		1	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2
Cantidad de vehiculos requeridos		11	14	7	9	9	11	9	10	4	6	12	14
Desglose de costos (Primer año)													
Camion	USD	243 800	400 680	241 500	396 900	264 500	434 700	253 230	416 178	242 880	399 168	276 000	453 600
Combustible	USD/año	421 928	N/A	408 058	N/A	408 955	N/A	418 236	N/A	351 265	N/A	430 966	N/A
Electricidad	USD/año	N/A	248 123	N/A	159 642	N/A	277 505	N/A	160 862	N/A	172 461	N/A	331 748
O&M	USD/año	67 389	49 419	63 843	49 050	63 911	50 330	65 536	53 621	53 998	37 647	67 234	50 829
Peajes	USD/año	17 534	14 287	52 152	44 520	121 953	106 709	19 800	18 000	54 528	42 240	5 961	5 007
Salario conductores	USD/año	72 167	71 440	42 506	42 592	39 112	38 375	73 977	75 821	91 289	91 838	36 454	36 868
Seguros	USD/año	5 712	5 712	7 616	7 616	7 598	7 598	5 490	5490	5 407	5 407	5 445	5 445
Rendimiento economico	USD/km	1.93	2.26	1,98	1,99	2,14	2,48	2,03	1,95	2,18	2,64	1,93	2,47
Precio de hidrogeno que iguala el rendimiento economico del diésel	USD/kg	1,35	N/A	1,12	N/A	0,15	N/A	1,13	N/A	0,1	N/A	1,45	N/A
Resumen economico de tecnologias - caso camiones													
CAPEX	USD	4 807 587	10 513 440	3 035 223	6 724 620	4 212 930	8 634 780	4 060 785	7 664 580	1 742 693	4 496 688	5 824 240	11 254 320
OPEX	USD	60 554 528	52 082 653	37 911 183	26 614 262	55 157 421	51 071 896	49 437 926	30 651 548	21 287 729	20 555 137	60 960 324	56 248 461
TCO	USD	65 362 114	62 596 093	40 946 406	33 338 882	59 370 351	59 706 676	53 498 711	38 316 128	23 030 423	25 051 825	66 784 564	67 502 781
Desglose TCO													
CAPEX	%	4,0%	16.8%	4,1%	20,2%	4,0%	14,5%	4,3%	20,0%	4,2%	17,9%	5,0%	16,7%
Costo combustible	%	64.1%	49.8%	62,5%	38,7%	55,5%	45,9%	63,0%	37,7%	54,6%	37,1%	69,4%	61,7%
O&M Tren de potencia	%	11.8%	11.7%	11,6%	14,0%	10,3%	9,8%	11,7%	14,8%	9,9%	9,6%	12,8%	11,2%
Peajes	%	3.1%	3.4%	9,5%	12,7%	19,6%	20,8%	3,5%	5,0%	10,0%	10,7%	1,1%	1,1%
Salario conductor	%	12.7%	16.9%	7,7%	12,2%	6,3%	7,5%	13,2%	21,0%	16,8%	23,3%	6,9%	8,1%
Seguros	%	1.0%	1.4%	1,4%	2,2%	1,2%	1,5%	1,0%	1,5%	1,0%	1,4%	1,0%	1,2%

6.3 Caso 3: Comparación entre países

Para comparar la rentabilidad de proyectos de camiones y buses FCEV entre países de la RedH2R, se utilizó el VAN acumulado al año 10 como indicador. Según estudios sobre evaluación de inversiones y proyectos de gran escala (IDB, *Cost-Benefit Analysis for Development*, 2016), esta métrica permite detectar tempranamente diferencias en viabilidad y evaluar escenarios bajo alta incertidumbre, como es el caso de tecnologías emergentes.

Se simularon los mismos proyectos ya descritos, manteniendo modelos de vehículos, rutas y criterios operativos. La comparación abarca los países miembros, aplicando primero condiciones base y luego distintos tipos de subsidios.

En primer lugar, se calculó el TCO de buses y camiones impulsados por hidrógeno para todos los países de la Red de H2R (ver **Tabla 33**). Para el caso de camiones, las diferencias de TCO entre países alcanzan casi un 300% (TCO de 2,87 veces para Argentina respecto a Costa Rica). El valor del TCO depende principalmente de la cantidad de camiones necesarios para el transporte de la misma carga, la cual varía entre países dadas las diferencias de rutas. En el caso de buses, se consideró un único vehículo y misma cantidad de pasajeros transportados, por lo que las diferencias dependen exclusivamente de las condiciones de las rutas- inclinación, velocidad del viento y distancias.

Tabla 33 Comparación de TCO de electromovilidad propulsada a H2 entre países de la RedH2R

Países	TCO Buses (MM USD)	TCO Camiones (MM USD)
Argentina	5.11	66.8
Chile	5.21	65.4
Colombia	5.29	40.9
Costa Rica	4.41	23.0
México	5.48	59.4
Uruguay	5.85	53.5

A continuación, se realiza un cálculo más detallado el que permite comparar escenarios para cada país, utilizando el VAN a la mitad del horizonte de tiempo del proyecto. En una primera etapa, se evaluaron proyectos de camiones y buses con tecnología FCEV y BEV en los países de la RedH2R, comparando el VAN al año 10. Esto permitió identificar los países con mejores condiciones para implementar estos proyectos, así como las variables clave que inciden en su viabilidad económica. En una segunda etapa, y solo en los casos donde se comprobó la inviabilidad financiera de los proyectos con hidrógeno, se analizaron medidas de subvención aplicadas de forma secuencial sobre los costos de inversión y operación, con el objetivo de determinar el tipo de apoyo más eficaz para mejorar su rentabilidad.

6.3.1 Camiones

La **Figura 20** muestra el VAN al año 10 para camiones FCEV y BEV. Bajo condiciones actuales, ningún país alcanza su periodo de recuperación (o *payback*) con camiones FCEV en ese plazo, lo que no lo hace rentable. Aunque las diferencias entre países no superan el 100 %, representan montos de hasta 100 000 USD. Argentina presenta el mejor resultado, seguida de Chile, Colombia y Uruguay, con diferencias menores a 50 000 USD. En el extremo opuesto se encuentran México y Costa Rica.

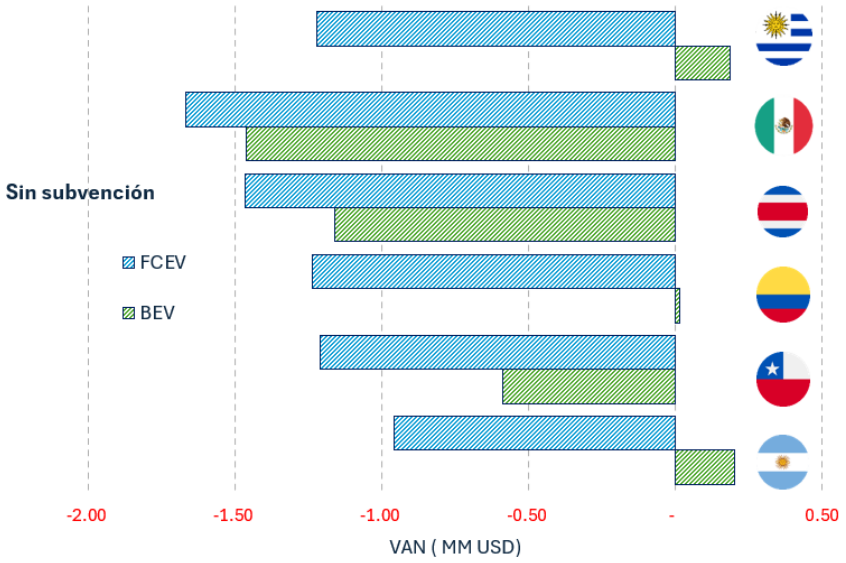

Figura 20 VAN-10 años para proyectos de camiones FCEV y BEV en países de la RedH2R

Dado que la tarifa de transporte es constante, las principales diferencias provienen de los kilómetros recorridos y los costos operativos locales. Las diferencias en aranceles de importación e IVA sobre el CAPEX tienen poco peso en el resultado final.

La **Tabla 34** muestra los componentes del OPEX con mayores diferencias entre países. Chile y Argentina presentan los costos de combustible más altos, producto de una combinación entre altos valores de IVA y largas distancias recorridas. No obstante, Argentina compensa con peajes y menores salarios de conductores, mientras que Chile mantiene costos elevados en ambos ítems. Uruguay y Colombia mantienen al menos uno de estos costos (peajes o salarios) en niveles altos, afectando su competitividad relativa.

Tabla 34 Componentes del OPEX para camiones FCEV

Costos (USD)	Argentina	Chile	Colombia	Costa Rica	México	Uruguay
Km recorrido	426 000	434 160	411 312	366 360	422 400	411 840
Combustible (H2)	430 966	431 983	418 236	351 265	408 955	408 058
Peajes	5 961	17 534	7 167	54 528	121 953	52 152
Salario conductores	36 454	72 167	73 977	91 289	39 112	42 506
Seguro	5 445	5 712	7 616	5 407	7 598	5 490

Los camiones eléctricos muestran un mejor desempeño económico (ver **Figura 20**). En Argentina, Colombia y Uruguay alcanzan rentabilidad al año 10, influenciados en parte por menores costos de electricidad.

Luego, se aplicó un escenario de subvención que incluye una reducción del 50 % en el CAPEX, exención de aranceles de importación y un aumento del 25 % en la tarifa de transporte, bajo un enfoque de mercado premium. Tal como muestra la **Figura 21**, este conjunto de medidas benefició principalmente a países con bajos costos operativos, como Argentina, donde el proyecto en la ruta Buenos Aires–Córdoba alcanzó rentabilidad al año 10. En el resto de los países, aunque el VAN mejoró, la subvención no fue suficiente para lograr viabilidad en el corto plazo.

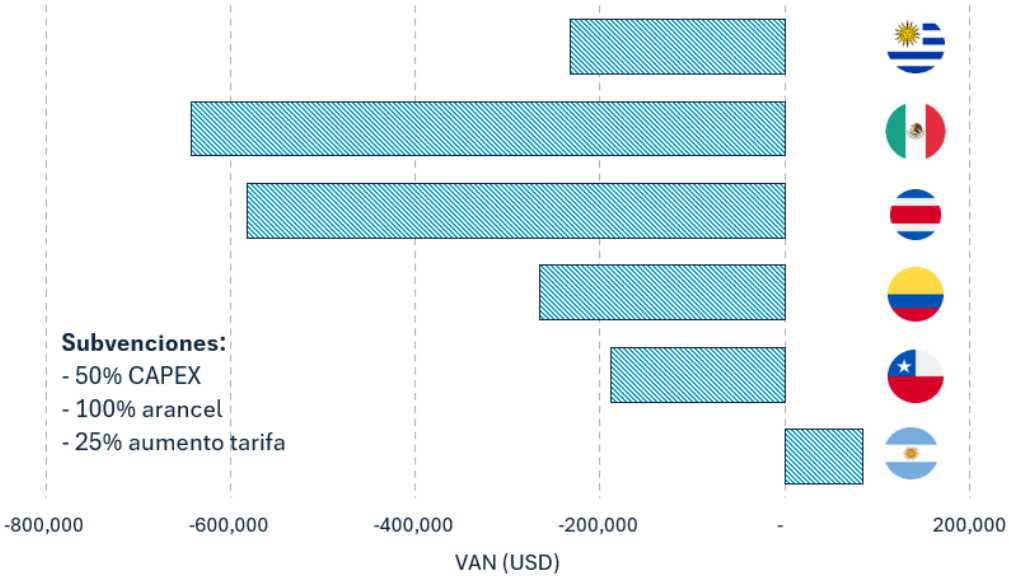

Figura 21 VAN-10 años para camiones FCEV con subvención a costos capitales, arancelarios y un aumento en la tarifa de transporte.

Por último, se aplicó una subvención de 3.65 USD/kgH_2 al precio del hidrógeno en la estación de dispensación. Este valor, identificado en el Caso 1, corresponde al precio umbral que permite a los camiones FCEV competir con los de combustibles convencionales. Los resultados, mostrados en la **Figura 22**, evidencian que este subsidio tiene el mayor impacto sobre la rentabilidad del proyecto, ya que el hidrógeno representa el componente más determinante del TCO en este tipo de iniciativas, como se observó en los análisis anteriores.

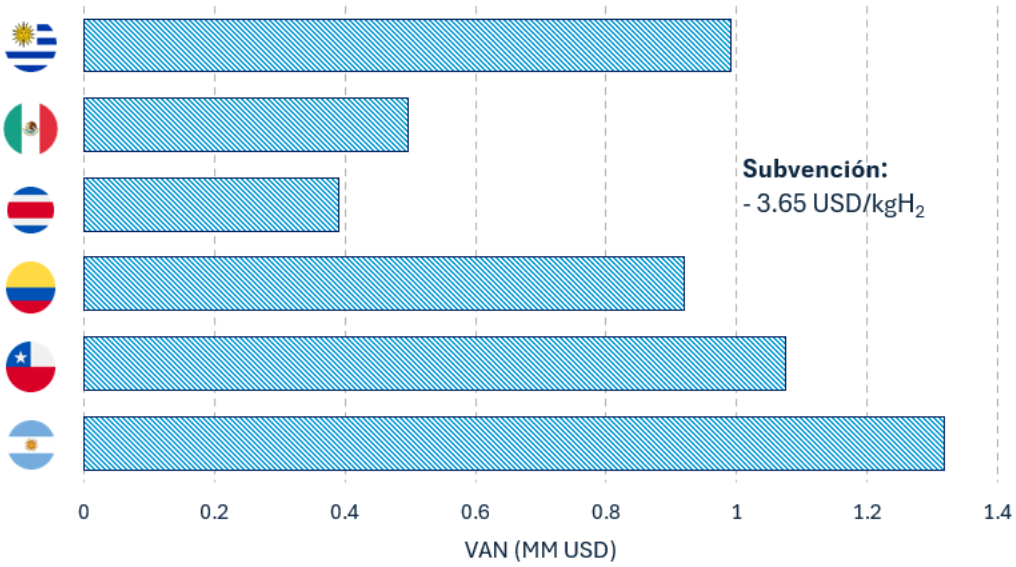

Figura 22 VAN al décimo año con subvención al costo del combustible

Adicionalmente, se estimó el precio del hidrógeno requerido para que el VAN del proyecto sea igual a 0 al décimo año, en cada uno de los países simulados. Este análisis permite identificar el umbral de rentabilidad: el precio al cual los ingresos generados compensan exactamente los costos de inversión y operación durante ese periodo. Así, se obtiene un valor de referencia que facilita la comparación entre países considerando sus condiciones locales, y permite evaluar la sensibilidad del proyecto frente al precio del hidrógeno como variable crítica.

Los resultados, presentados en la **Figura 23**, muestran una alta variabilidad entre países. Costa Rica (2.11 USD/kgH_2) y México (2.18 USD/kgH_2) presentan los valores más bajos, lo que indica una mayor sensibilidad al precio del hidrógeno y un mayor potencial de viabilidad si se logra producir a precios competitivos. En contraste, Argentina (3.45 USD/kgH_2) y Chile (3.07 USD/kgH_2) requieren precios más altos para alcanzar el equilibrio económico, lo que sugiere un mejor posicionamiento estructural para absorber costos mayores. Uruguay (2.98 USD/kgH_2) y Colombia (2.90 USD/kgH_2) se encuentran en un rango intermedio.

Este ejercicio confirma que las diferencias en infraestructura, tarifas energéticas, costos laborales y condiciones operativas locales inciden directamente en la viabilidad de los proyectos FCEV. Por ello, las estrategias nacionales deben considerar estos umbrales económicos como referencia clave en el diseño de políticas para el desarrollo del hidrógeno.

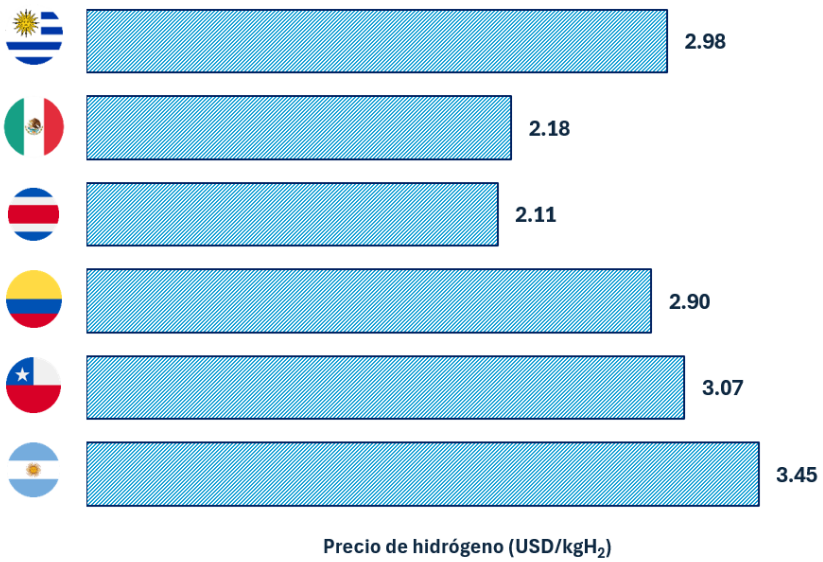

Figura 23 Precio requerido de hidrógeno para obtener un VAN igual a 0 en cada país

6.3.2 Buses

Tal como se observó en el Caso 2, todos los proyectos de buses alcanzan un VAN positivo al décimo año, lo que sugiere que, bajo las condiciones simuladas, tanto los buses FCEV como BEV presentan una rentabilidad aceptable a largo plazo.

Como se muestra en la **Figura 24**, la diferencia de VAN entre ambas tecnologías es moderada en la mayoría de los países, lo que refleja una competencia relativamente equilibrada. Sin embargo, Uruguay destaca con un VAN mayor en ambos casos, explicado por la alta tarifa por pasajero del sistema de transporte tradicional. Este mayor ingreso unitario amplía el margen económico del proyecto, independientemente de la tecnología empleada.

En contraste, países como Colombia, Costa Rica y México presentan diferencias más acotadas, con una ligera ventaja para los proyectos BEV. En Argentina, el bus FCEV muestra un desempeño apenas inferior al del BEV, lo que sugiere que la elección entre tecnologías podría depender más de factores operacionales —como autonomía o disponibilidad de infraestructura— que de diferencias económicas significativas. En este contexto, el FCEV podría ser una alternativa viable para rutas de largo alcance o con requerimientos de recarga rápida.

Es importante señalar que alcanzar un VAN positivo no implica una recuperación temprana de la inversión. En la mayoría de los países, se requiere un período de al menos 5 a 8 años para alcanzar el punto de equilibrio, lo que representa una barrera para proyectos que buscan retornos en el corto plazo. Además, aunque las tecnologías limpias resulten rentables entre sí, su competitividad frente al diésel —que sigue dominando el mercado por sus menores costos iniciales y amplia infraestructura— aún representa un desafío.

En síntesis, los resultados respaldan la viabilidad económica de ambas tecnologías para el transporte público, pero también evidencian la importancia de considerar factores locales como tarifas, subsidios, políticas públicas y escalabilidad para garantizar una implementación efectiva y sostenible.

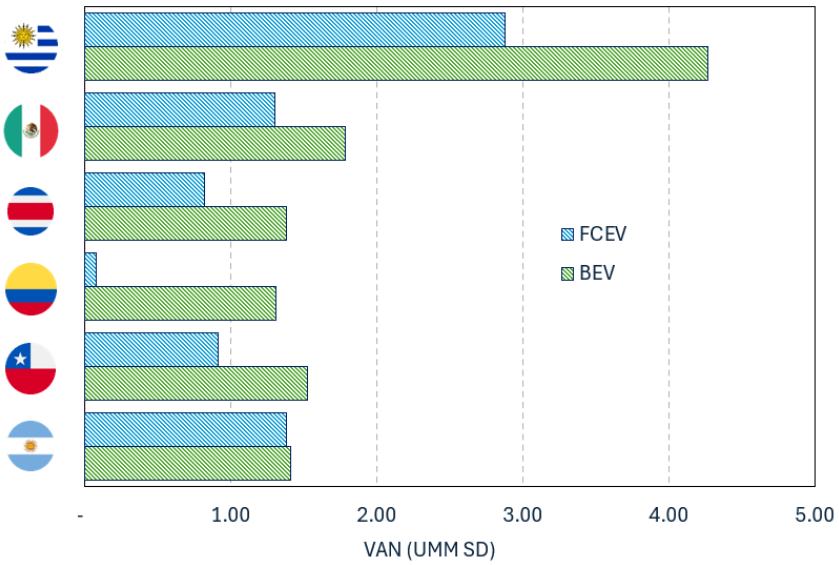

Figura 24 VAN de los proyectos de buses hidrógeno y a baterías al décimo año

6.4 Análisis de los casos de estudio

En la **primera simulación**, se seleccionó una ruta específica para calcular la cantidad de material transportado durante un año. Bajo este enfoque, los camiones FCEV, al contar con mayor autonomía y menores tiempos de recarga, recorren una mayor distancia anual. Esto se traduce en un mayor consumo de hidrógeno, más peajes pagados y, crucialmente, mayor volumen de carga transportada, que es el objetivo central de la operación. Cabe señalar que, en la práctica, la tarifa por transporte puede variar según el tipo de material movilizado. Por ello, podría incorporarse en futuras simulaciones tarifas diferenciadas según la carga, lo que permitiría refinar la evaluación económica del proyecto.

Otro elemento clave es la distancia recorrida en función de la energía consumida. La relación km/kWh para BEV (F=2.26) y FCEV (F=1.93) favorece al hidrógeno si se considera un precio de referencia de 5 USD/kgH_2, lo que refuerza la importancia de alcanzar este umbral para lograr competitividad.

En una **segunda simulación**, se planteó como objetivo transportar una cantidad fija de material al año. En este escenario, se requieren 11 camiones FCEV y una HRS en ruta, mientras que para cumplir el mismo objetivo con BEV se necesitan 14 camiones y dos estaciones de carga. Esta diferencia explica por qué el CAPEX de BEV es superior al de FCEV.

Al analizar el OPEX, el combustible representa el mayor costo para FCEV, reafirmando su impacto crítico en la viabilidad de estos proyectos. En el caso de BEV, los costos asociados al salario de conductores son más relevantes, especialmente considerando las diferencias observadas entre países en la **Tabla 34**, donde se evidencian variaciones significativas en salarios y peajes debido a políticas nacionales.

Aunque la simulación no considera los costos de infraestructura de recarga, destacando que esta inversión afectaría el CAPEX total. La instalación de dos electrolineras para BEV podría competir en costo con una HRS para FCEV, dependiendo de la ruta y las condiciones específicas de cada país, lo que escapa al alcance de esta simulación.

En el caso de los buses, el CAPEX de BEV es menor que el de FCEV, principalmente debido a los menores costos tecnológicos. Dado que ambos modelos transportan la misma cantidad de pasajeros, y por lo tanto los ingresos por precio de pasaje son iguales, la ventaja de autonomía de FCEV pierde relevancia en este mercado al ser independiente de las veces que se cargue el combustible. Además,

en los servicios interurbanos es común realizar paradas entre trayectos, lo que puede aprovecharse para la recarga de buses BEV, reduciendo su desventaja operacional. En contraste, FCEV presenta costos elevados tanto en vehículos como en combustible, lo que disminuye su competitividad en este segmento.

Para la **tercera simulación**, y tomando como referencia la Tabla 34, se evaluó la relación entre los kilómetros recorridos y los principales costos operacionales: combustible, peajes, seguros y salarios de conductores. A partir de esta comparación, se destacan los siguientes elementos por país.

Tabla 35 Análisis de ventajas y desventajas por país de la Red RH2 para FCEV.

País	Ventajas	Desventajas
Argentina	Los precios más bajos en seguros, peajes y sueldos de conductores.	Segundo país con mayor costo en combustible.
Chile	Se mantiene con precios bajos en seguros y peajes.	Comparativamente ningún precio es muy elevado en comparación al resto
Colombia	Peajes más bajos que el resto de los países	Es el precio más caro de combustible de los 6 países estudiados, también posee los seguros más costosos.
Costa Rica	Precio de combustible más bajo comparativo con los 6 países mencionados	Sueldo de conductores y peajes más altos
México	Segundo valor de combustible más bajo y salario conductores bajo	Seguros y peajes más altos
Uruguay	Costos dentro del promedio	Comparativamente ningún precio es muy elevado en comparación al resto

Si bien las variaciones en seguros y combustible no son drásticas entre países, el precio del hidrógeno es el factor con mayor impacto sobre el VAN, como se evidenció en los análisis anteriores. Tal como se observa en la **Figura 9**, los países con mayor potencial para proyectos de camiones FCEV son, en orden, Argentina, Chile, Uruguay y Colombia. Es importante destacar que Costa Rica y México presentan los resultados de VAN más bajos, debido principalmente al alto costo de peajes y salarios en el primer caso, y a los elevados peajes en el segundo.

Por otro lado, la **Figura 21** muestra que, incluso al simular una reducción del CAPEX, exención de aranceles y un aumento de tarifa, la variable más decisiva sigue siendo el precio del combustible. La subvención al hidrógeno es el único escenario que permite viabilidad económica generalizada en todos los países.

Para **futuros estudios** enfocados en camiones, se recomienda ampliar el análisis hacia operaciones distintas al transporte convencional de materiales o productos. Algunas aplicaciones recomendadas a considerar son:

- Camiones compactadores de basura
- Camiones aljibe, cisterna o de transporte de líquidos
- Camiones con alza hombre
- Camiones con grúa de izaje
- Camiones mixer (mezcla de hormigón)
- Camiones refrigerados

Aunque gran parte de los camiones actualmente se utilizan para el transporte de carga, también se requerirá evaluar cómo se comportan las tecnologías FCEV y BEV bajo condiciones operacionales más exigentes, especialmente cuando el vehículo opera con equipos auxiliares de alta demanda energética. Este tipo de análisis permitiría estimar el impacto sobre la autonomía y el rendimiento económico real de estas tecnologías. Asimismo, será fundamental estudiar cuántas HRS serían necesarias y su ubicación

óptima para abastecer no solo operaciones de larga distancia, sino también aquellas más especializadas como las señaladas anteriormente.

En el caso de los buses, se sugiere incorporar variables que no fueron consideradas en esta simulación, pero que pueden incidir de manera significativa en la evaluación económica de los proyectos. Entre ellas:

- Diferenciación tarifaria por categoría de servicio (buses estándar, semi-cama, premium)
- Variaciones estacionales en la tarifa, como alzas durante festivos, vacaciones o fines de semana largos
- Costos adicionales asociados a la contratación de un asistente de viaje, práctica habitual en trayectos largos
- Modelos de operación privada, como el transporte de personal de empresas, los cuales presentan dinámicas distintas al transporte interurbano tradicional y ameritan una evaluación independiente

Estas líneas de investigación permitirían fortalecer el entendimiento del mercado y optimizar el diseño de proyectos de electromovilidad en función de sus usos reales y contextos operacionales.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El presente estudio evaluó la viabilidad técnica, económica y operativa de la electromovilidad basada en hidrógeno renovable (FCEV) frente a la tecnología eléctrica a baterías (BEV), con foco en los países que integran la Red RH2. Los resultados evidencian que, si bien los BEV presentan ventajas asociadas a costos y disponibilidad de infraestructura, los FCEV ofrecen un mejor rendimiento en aplicaciones de transporte pesado y de larga distancia, debido a su mayor autonomía, capacidad de carga útil y menor tiempo de recarga.

La transición hacia tecnologías basadas en hidrógeno requerirá del fortalecimiento de condiciones habilitantes mínimas, incluyendo estrategias energéticas claras, metas nacionales definidas, y herramientas de fomento público que proporcionen señales adecuadas a los inversionistas.

Existe heterogeneidad en el desarrollo del mercado para los países de la red.

El análisis regulatorio evidencia que la ausencia de normativas específicas y armonizadas para la homologación de vehículos y la operación de HRS constituye una de las principales barreras para la masificación de la movilidad con hidrógeno en la región. Aunque existen avances puntuales en países como Chile y Uruguay, la mayoría de los miembros de la Red RH2 aún dependen de marcos generales o de la adopción de estándares internacionales, lo que genera incertidumbre para la inversión y retrasa la consolidación de proyectos. Esta disparidad normativa refleja la necesidad de contar con lineamientos regionales que aseguren seguridad técnica, respaldo jurídico y coherencia en la implementación.

La disponibilidad y el grado de preparación para la adopción del hidrógeno varían significativamente entre los países de la Red RH2. Por ejemplo, Chile cuenta con condiciones propicias en el sector minero y ya ha avanzado en experiencias de homologación de FCEV (camión Hidrohaul, bus Reborn, Toyota Mirai), mientras Uruguay ha definido un reglamento técnico específico y resoluciones como la 349/024 de URSEA que consolidan un marco nacional. En contraste, países como México carecen aún de un marco regulatorio para la homologación de FCEV y HRS, lo que limita su desarrollo, mientras que en Costa Rica los costos operacionales actuales representan una barrera importante. Argentina y Colombia, por su parte, avanzan en marcos normativos incipientes, pero aún dependen de certificaciones internacionales o requieren de resoluciones específicas para HRS. Esta heterogeneidad regulatoria y de infraestructura condiciona de manera directa la velocidad de adopción en cada mercado.

Asimismo, se constata que la competitividad de las tecnologías difiere según el contexto territorial. En entornos urbanos como los de Uruguay o Costa Rica, los buses BEV permiten adaptar los recorridos y aprovechar la infraestructura eléctrica disponible, mientras que en corredores logísticos de larga distancia, como los analizados en Chile (minería) o México (rutas de alto peaje), los camiones FCEV presentan ventajas por su autonomía y rapidez de abastecimiento. En Argentina, por ejemplo, se sugiere priorizar camiones de hidrógeno para transporte de carga pesada, manteniendo BEV en buses urbanos, mientras que en Colombia la topografía variable entre ciudades representa un desafío adicional que condiciona la elección tecnológica. Estos casos muestran que la planificación debe diferenciar entre zonas urbanas y zonas aisladas o de gran escala operativa.

En el caso de camiones, la relación entre capacidad de carga y autonomía posiciona a los FCEV como una opción competitiva en el largo plazo, una vez superadas las barreras de entrada tecnológicas y logísticas. Por el contrario, en el segmento de buses, las condiciones actuales permiten adaptar los recorridos y tiempos de operación a las limitaciones de la tecnología BEV, reduciendo el incentivo para una adopción temprana del hidrógeno en este ámbito. Sin embargo, debe considerarse que la vida útil de las baterías eléctricas implica un recambio entre los 8 y 12 años de operación, con efectos ambientales y económicos que podrían alterar esta proyección en el futuro.

Los resultados de simulación confirman que, en condiciones ideales, los camiones FCEV permiten mayor eficiencia operativa en recorridos largos, con menor consumo específico de energía y menor necesidad de flota. No obstante, el precio del hidrógeno se mantiene como la variable más crítica para viabilizar estos proyectos. Mientras la tecnología madura, reducciones sostenidas de costos mediante economías de escala o políticas de subsidios podrían mejorar el perfil económico de esta tecnología, pero ambas medidas deben ser estudiadas en mayor profundidad. La simulación desarrollada debe considerarse como una herramienta exploratoria, que permite ser actualizada a medida que surjan nuevos modelos vehiculares, rutas alternativas y esquemas de apoyo. Cabe destacar que la viabilidad técnica y económica de los proyectos de electromovilidad con BEV y FCEV debe entenderse siempre bajo el cumplimiento estricto de estándares internacionales de seguridad. Aunque este estudio no modela cuantitativamente dichos aspectos, se reconoce que la gestión de riesgos —eléctricos en el caso de los BEV y asociados al hidrógeno en el caso de los FCEV— constituye una condición habilitante indispensable para cualquier escenario de implementación.

La validación del estudio con representantes del sector público y privado permitió ajustar los supuestos del análisis, incorporar retroalimentación contextual y constatar un interés creciente por parte de actores locales en avanzar hacia pilotos o esquemas demostrativos, especialmente en sectores estratégicos como minería, transporte urbano o logística pesada. En este contexto, el fortalecimiento de capacidades regulatorias y técnicas, así como la articulación regional, se identifican como elementos clave para acelerar el desarrollo de una cadena de valor sostenible para la movilidad basada en hidrógeno.

7.2 Recomendaciones

La electromovilidad con hidrógeno enfrenta actualmente una etapa de transición, donde las condiciones del mercado favorecen una adopción inicial de tecnologías BEV, aunque con limitaciones estructurales que, a futuro, podrían impulsar la expansión del hidrógeno como vector energético complementario. En el caso del transporte de carga, las características técnicas de los FCEV —mayor autonomía, capacidad de carga y rapidez de abastecimiento— sugieren ventajas operativas, especialmente en rutas extensas o de alta exigencia. Sin embargo, la menor disponibilidad de infraestructura y el costo del hidrógeno continúan limitando su despliegue. Se proyecta una solución mixta, con una mayor participación inicial de BEV y una incorporación progresiva de camiones FCEV conforme se desarrolle la industria.

En el caso de los buses, si bien no se identifica una ventaja técnica determinante a favor del hidrógeno, el impacto ambiental asociado al reemplazo de baterías de litio en el largo plazo representa un desafío no menor. En este contexto, el hidrógeno podría adquirir un rol creciente como alternativa de menor impacto, por lo que se recomienda analizar escenarios de inversión anticipada en esta tecnología, considerando la evolución del mercado de reciclaje y la necesidad de soluciones sostenibles a mediano plazo.

Además, se recomienda que todo proyecto piloto o comercial de electromovilidad con BEV o FCEV en la región incorpore desde su etapa inicial un plan integral de seguridad, alineado con normativas internacionales (ISO, SAE, NFPA, entre otras). Este plan debe contemplar la capacitación de operadores, inspecciones periódicas basadas en riesgo y protocolos de respuesta ante emergencias, asegurando que la seguridad sea un eje transversal en el diseño, operación y escalamiento de las tecnologías.

De acuerdo al diagnóstico realizado para los países de la red y validado por distintos actores del mercado, se proponen las siguientes etapas o priorizaciones por país.

Argentina
Argentina presenta condiciones favorables para el desarrollo de flotas FCEV, especialmente en el transporte de carga.
Se recomienda:

- Priorizar la implementación de camiones de hidrógeno en una etapa inicial, mientras se utiliza la tecnología BEV en buses para satisfacer la demanda urbana con soluciones ya maduras, hasta que la infraestructura de hidrógeno esté disponible.

- Definir un procedimiento específico de homologación para FCEV y HRS, dado que actualmente se depende de certificaciones internacionales.
- Aprovechar la flexibilidad del Decreto N.º 779/95 para generar guías nacionales de homologación, facilitando la validación de proyectos piloto.
- La disponibilidad de hidrógeno en Argentina está asociada a proyectos incipientes en la Patagonia, lo que favorece su uso en corredores logísticos de larga distancia hacia puertos y zonas mineras. En contraste, las áreas urbanas de alta densidad deberían concentrarse en BEV mientras se desarrolla la red de HRS.

Chile

La geografía y el perfil industrial de Chile, particularmente en el sector minero, ofrecen condiciones propicias para la adopción temprana de camiones FCEV. Se recomienda:

- Iniciar con pilotos en minería u otros sectores con alta capacidad financiera, con miras a expandir la tecnología a otros segmentos logísticos una vez demostrada su eficiencia.
- Consolidar la experiencia acumulada en homologación de FCEV (camión Hidrohaul, bus Reborn, Toyota Mirai) en un reglamento específico que otorgue certeza jurídica a futuros proyectos.
- Formalizar un marco normativo estable para las HRS, evitando depender del mecanismo de "Proyecto Especial" ante la SEC.
- La alta disponibilidad proyectada de hidrógeno verde en el norte y sur del país refuerza la viabilidad de proyectos de transporte pesado FCEV en minería y corredores de exportación. En entornos urbanos, en cambio, la red eléctrica consolidada favorece la adopción de BEV para transporte público.

Colombia

La variabilidad altitudinal entre ciudades representa un desafío operativo para los FCEV. Se sugiere:

- Desarrollar estudios específicos por corredor y continuar con el despliegue de BEV en el corto plazo, evaluando medidas de apoyo para reducir los costos del hidrógeno y mejorar la viabilidad de la tecnología.
- La producción de hidrógeno en Colombia se concentra en proyectos piloto vinculados a la costa y al sector eléctrico, lo que limita su disponibilidad en ciudades del interior. En consecuencia, los BEV resultan más adecuados en entornos urbanos de alta densidad, mientras que los corredores de exportación hacia puertos pueden evaluarse como focos iniciales para FCEV.
- Establecer protocolos claros de homologación para FCEV, diferenciados de los BEV.
- Acelerar la implementación del Decreto 1476/2022 mediante resoluciones específicas que regulen diseño, construcción y operación de HRS.

Costa Rica

Los costos operacionales actuales dificultan la adopción de flotas FCEV. Se recomienda:

- Explorar subsidios y simular rutas alternativas, con el objetivo de identificar configuraciones más eficientes para una introducción progresiva de esta tecnología.
- Evolucionar del marco estratégico (Plan interinstitucional 2018 y Comité Técnico Nacional de Hidrógeno) hacia un proceso formal de homologación de FCEV y autorización de HRS.
- Integrar las normas técnicas elaboradas por INTECO en regulaciones obligatorias para movilidad con hidrógeno.
- La disponibilidad de hidrógeno en Costa Rica aún es reducida y concentrada en proyectos piloto, por lo que los BEV son la alternativa prioritaria en zonas urbanas. En cambio, en corredores turísticos o logísticos aislados podrían explorarse soluciones FCEV si se articulan subsidios al costo del combustible.

México

El desarrollo del mercado todavía es incipiente, destacando que aún no se cuenta con una hoja de ruta como otros países de LATAM. Se sugiere:

- Replicar las simulaciones en otros corredores logísticos y evaluar esquemas de incentivo para reducir el costo operativo de estas flotas.
- Diseñar una ruta regulatoria para la homologación de FCEV, actualmente inexistente.
- Definir un marco para la instalación y operación de HRS, tomando como referencia normas internacionales (ISO, SAE, IEC) adaptadas a la realidad local.
- La producción de hidrógeno en México se vincula a polos industriales y petroquímicos, lo que facilita su uso en corredores específicos de transporte pesado, mientras que en entornos urbanos de alta densidad se recomienda mantener la expansión de BEV apoyados en la infraestructura eléctrica existente.

Uruguay
Uruguay presenta un entorno favorable para comenzar con buses FCEV. Este enfoque permitiría crear las condiciones iniciales para el desarrollo de HRS, facilitando una eventual incorporación de camiones. Se recomienda:

- Avanzar hacia el autoabastecimiento energético como estrategia de largo plazo.
- Continuar el desarrollo e implementación del Reglamento Técnico MERCOSUR sobre FCEV, asegurando su pronta entrada en vigor.
- Aplicar y fortalecer la Resolución 349/024 de URSEA, consolidando un estándar nacional que pueda servir de modelo para otros países de la región.
- La alta disponibilidad de energías renovables en Uruguay permite una producción local de hidrógeno competitiva, lo que facilita el desarrollo de buses FCEV en zonas urbanas y, a futuro, la integración de camiones en corredores logísticos hacia la frontera.

La experiencia internacional y las iniciativas existentes en los países de la red ofrecen aprendizajes que pueden ser replicados en cada país, combinando modelos de negocio y mecanismos de financiamiento para acelerar la adopción de FCEV. Entre los esquemas más conocidos se destaca el Leasing con respaldo público (B2G) como la flota de transporte público eléctrica RED en Chile, el uso de Fondos nacionales como catalizadores de proyectos de autoconsumo o alianzas (B2I/B2B), el modelo H2-as-a-service (B2B) probado en Suiza con Hyundai, basado en pago por km o por kg de hidrógeno, Incentivos tributarios y exenciones (B2C/B2G reduciendo aranceles e impuestos, favoreciendo proyectos de FCEV y Modelos integrados (B2C/B2B) como HysetCo en París que simplifican el uso de FCEV para empresas o particulares y agrupa demanda.

Para potenciar el desarrollo en la región, se recomienda que los actores privados colaboren con autoridades locales no solo en la identificación de corredores prioritarios y en la estructuración de contratos que den visibilidad a la demanda, sino también entregando información clara sobre las condiciones reales de operación bajo las cuales se viabilizan los proyectos (costos del hidrógeno, CAPEX de vehículos, disponibilidad de infraestructura). Esto, además de participar en redes de colaboración e información como la Red de Aprendizaje H2 de GIZ, o más directamente, participando con información en aplicaciones web o móviles para ver la ubicación y estado de estaciones de recarga para usuarios, esto replica casos internacionales como H2Map en Europa o la aplicación Eco Carga de electrolineras en Chile. Esta información entre desarrolladores, usuarios y retroalimentación para entidades públicas y técnicas permite diseñar regulaciones, incentivos y programas más ajustados a la realidad del mercado y, por ende, más efectivos para impulsar el despliegue de los FCEV en América Latina.

El análisis comparativo evidencia que, bajo condiciones óptimas, los FCEV ofrecen ventajas técnicas y operativas frente a los BEV en sectores específicos. Sin embargo, la velocidad de adopción de estos últimos ha estado fuertemente influida por la disponibilidad de infraestructura y menores costos iniciales. En este contexto, los BEV constituyen una solución de transición eficiente hacia la carbono neutralidad, aunque con limitaciones que podrían requerir su reevaluación en el futuro. La planificación estratégica debe considerar este equilibrio dinámico, anticipando el rol que el hidrógeno podrá desempeñar en una matriz de transporte sostenible a largo plazo.

8. Referencias

[1] A. K. Burke, “Technology, Sustainability, and Marketing of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Medium-Duty and Heavy-Duty Trucks and Buses in 2020-2040,” 2020.

[2] H. Peng et al., “Emission accounting and drivers in South American countries,” Appl Energy, vol. 358, p. 122528, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122528.

[3] IEA, “Global EV Outlook 2025 - Expanding sales in diverse markets,” 2025.

[4] EMBER, “Latin America and Caribbean Clean power replacing emissions-intensive fossil fuels.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: https://ember-energy.org/countries-and-regions/latin-america-and-caribbean/#insights

[5] Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA), “Fuel Cell Basics,” FCHEA Learning Center, [Online]. Available: https://www.fchea.org/learning-center/fuel-cell-basics. [Accessed: 21-Aug-2025]

[6] Sustainable mobility for all, “Electromobility in the global south: An Equitable transition toward road passenger transport decarbonization,” 2022.

[7] Volvo, “Volvo FH Aero Electric.”

[8] Ariel Álvarez Gebelin, Lorena Di Chiara, and Felipe Bastarrica, “Observatorio de energía y Desarrollo Sustentable - Monitor Vehículos Eléctricos,” Mar. 2022.

[9] Cunanan, M.-K. Tran, Y. Lee, S. Kwok, V. Leung, and M. Fowler, “A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles,” Clean Technologies, vol. 3, no. 2, pp. 474–489, Jun. 2021, doi: 10.3390/cleantechnol3020028.

[10] S. S. Rawat, R. Kumar, and K. Das, “Lithium-ion battery progress in surface transportation: status, challenges, and future directions,” Multimed Tools Appl, Dec. 2024, doi: 10.1007/s11042-024-20505-3.

[11] Ministerio de energía, “Buses con celdas de combustible de hidrógeno.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/electromovilidad/transporte-con-hidrogeno/buses-h2

[12] C.y D. U. de A. Ministerio Federal de Transporte, Now-GMBH, and Sphera, “Investigación complementaria del programa sobre sistemas de propulsión y vehículos innovadores,” 2022.

[13] Hydrogen Refueling Solutions, “HRS – a leading European manufacturer of hydrogen refueling stations and expert in industrial piping,” *Hydrogen Refueling Solutions*, [Online]. Available: https://www.hydrogen-refueling-solutions.fr. [Accessed: 19-Aug-2025].

[14] Hyundai Motor Company, “Camión de hidrógeno Hyundai XCIENT Fuel Cell,” [Online]. Available: https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/eco-drive/tendencias/datos-camion-hidrogeno-hyundai-xcient-fuel-cell. [Accessed: Aug. 15, 2025].

[15] Union Europea, “Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe.”

[16] Hyundai, “XCIENT Fuel Cell Truck.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev

[17] Nikola, “Hydrogen-electric semi-truck.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.nikolamotor.com/tre-fcev

[18] China Trucks, “Dongfeng Liuzhou Chenglong H5V 282kwh 6x4 Charging&Swapping Tractor.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.chinatrucks.org/product/truck/1341.html

[19] Evaluación de camiones, “Destacada en la Feria de Hannover 2024: La Tractora de Hidrógeno de Sinotruk Shandeka Asombra al Mundo.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://ctinag.com/index.php/informacion-corporativa/616/

[20] Hibridos y electricos, “Hybot presenta el primer camión de hidrógeno gaseoso con mil km de autonomía,” Jan. 08, 2024. Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available:

https://www.hibridosyelectricos.com/camiones/este-es-primer-camion-hidrogeno-gaseoso-con-autonomia-1000-kilometros_72293_102.html
[21] Transmilenio, “Conoce El primer bus a hidrógeno verde ensamblado en el país.”
[22] "Marcopolo amplía su capacidad para producir autobús con tecnologías de cero emisiones," Revista Viajante, Jun. 14, 2022. [Online]. Available: https://viajante.marcopolo.com.br/es/noticias/marcopolo-amplia-su-capacidad-para-producir-autobus-con-tecnologias-de-cero-emisiones/ [Accessed: Aug. 15, 2025].
[23] Wright, “Streedeck Hydroliner FCEV.”
[24] Solaris, “Urbino 12 hydrogen.” Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.solarisbus.com/es/vehiculos/zero-emissions/hydrogen
[25] Colbún, “Alianza público-privada presenta el primer bus a hidrógeno hecho en Chile.” Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.colbun.cl/home/2024/12/12/alianza-publico-privada-presenta-el-primer-bus-a-hidrogeno-hecho-en-chile
[26] GlobalPetrolPrices.com, “Diesel prices, liter, 18-August-2025,” GlobalPetrolPrices.com, 18-Aug-2025. [Online]. Available: https://es.globalpetrolprices.com/diesel_prices/. [Accessed: 21-Aug-2025].
[27] T. Molina, “¿En qué posición está Chile?: Ranking de las cuentas de la luz más caras de Latinoamérica,” EMOL, 10-Jul-2025. [Online]. Available: https://www.emol.com/noticias/Economia/2025/07/10/1171845/cuentas-de-la-luz-latinoamerica.html. [Accessed: 21-Aug-2025].
[28] Ministerio de Energía, “Cargadores eléctricos: Conceptos generales.” Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/electromovilidad/sistemas-de-carga/cargadores-electricos
[29] M. Hirayama, H. Shinozaki, N. Kasai y T. Otaki, “Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles,” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, n.º 27, pp. 12584–12594, jul. 2018. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.003.
[30] Houpu, “Vehicle Application.” Accessed: Jul. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.hqhp-en.com/vehicle-application/
[31] Hexagon, “Hydrogen and battery electric mobility solutions.” Accessed: Jul. 27, 2025. [Online]. Available: https://hexagonpurus.com/our-solutions/mobility
[32] PDC Machines, “Hydrogen Compressors for Hydrogen Fueling Stations.” Accessed: Jul. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.pdcmachines.com/hydrogen-compressors-for-hydrogen-refueling-stations/
[33] WEH, “H2 Refueling Components from WEH.” Accessed: Jul. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.weh.com/hydrogen-refueling-components
[34] Staübli, “High flow self-service hydrogen refueling nozzle CHV.” Accessed: Jul. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.staubli.com/global/en/fluid-connectors/products/quick-and-dry-disconnect-couplings/fuels/hydrogen/chv08-refueling-nozzle-hydrogen.html
[35] H2 Mobility, “H2.LIVE – Hydrogen Stations in Europe,” H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG. [En línea]. Disponible en: https://h2.live. [Accedido: 19-ago-2025].
[36] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) y TÜV SÜD, “H2Stations.org – Global database of hydrogen refueling stations,” H2Stations.org. [En línea]. Disponible en: https://www.h2stations.org. [Accedido: 19-ago-2025].
[37] Hydrogen Europe, “European Hydrogen Refueling Station Map (H2-map.eu),” Hydrogen Europe. [En línea]. Disponible en: https://h2-map.eu. [Accedido: 19-ago-2025].
[38] Hydrogen Fuel Cell Partnership, “Station Map – Hydrogen Fueling Stations in California and the US,” H2FCP. [En línea]. Disponible en: https://h2fcp.org/stationmap. [Accedido: 19-ago-2025].
[39] GLP Autogas, “Hydrogen Stations in China,” GLP Autogas International. [En línea]. Disponible en: https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-china.html. [Accedido: 19-ago-2025].

[40] S. Park, B. Hashim, U. Zahid y J. Kim, “Global risk assessment of hydrogen refueling stations: Trends, challenges, and future directions,” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 106, pp. 1462–1479, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.438.

[41] Hydrogen Tools, “https://h2tools.org/fuel-cell-codes-and-standards.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://h2tools.org/fuel-cell-codes-and-standards

[42] A. Smaragdakis, S. Kamenopoulos y T. Tsoutsos, “How risky is the introduction of fuel cell electric vehicles in a Mediterranean town?”, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. 35, pp. 18075–18088, Jul. 2020. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.224

[43] Transport & Environment, “Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it,” 2019. [Online]. Available: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2019_11_Analysis_CO2_footprint_lithium-ion_batteries.pdf

[44] M. Mori, D. Iribarren, J. Cren, E. Cor, A. Lotrič, J. Gramc, and J. Dufour, “Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes,” International Journal of Hydrogen Energy, vol. 48, no. 99, pp. 39673–39689, 2023.

[45] G. K. Karayel, N. Javani, and I. Dincer, “A comprehensive assessment of energy storage options for green hydrogen,” Energy Conversion and Management, vol. 291, p. 117311, 2023.

[46] Z. Teng, C. Tan, P. Liu, and M. Han, “Analysis on carbon emission reduction intensity of fuel cell vehicles from a life-cycle perspective,” Frontiers in Energy, vol. 18, no. 1, pp. 16–27, 2024.

[47] Maxus Chile, “Maxus ET-2549,” [Online]. Available: https://maxus.cl/w/maxus-et-2549. [Accessed: Aug. 15, 2025].

[48] M. Garcia and S. Oliva, “Technical, economic, and CO2 emissions assessment of green hydrogen production from solar/wind energy: the case of Chile,” Energy, vol. 278, p. 127981, 2023.

[49] A. M. Syré and D. Göhlich, “Decarbonization of Long-Haul Heavy-Duty Truck Transport: Technologies, Life Cycle Emissions, and Costs,” World Electric Vehicle Journal, vol. 16, no. 2, p. 76, Feb. 2025, doi: 10.3390/wevj16020076.

[50] S. Bhardwaj and H. Mostofi, “Technical and Business Aspects of Battery Electric Trucks—A Systematic Review,” Future Transportation, vol. 2, no. 2, pp. 382–401, Apr. 2022, doi: 10.3390/futuretransp2020021.

[51] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, “Ley 21.305 - Ley Marco de Cambio Climático.” Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1160309

[52] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.” Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

[53] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Gobierno de Chile, “Política Nacional de Transporte 2050.” Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.mtt.gob.cl/archivos/167632

[54] Global Hydrogen Review, “Hydrogen pipeline infrastructure: A key to scaling up hydrogen deployment,” 2024. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.globalhydrogenreview.com/transport/01032024/hydrogen-pipeline-infrastructure-a-key-to-scaling-up-hydrogen-deployment/

[55] Hydrogen Council, “Global Hydrogen Flows: Capturing the opportunity of $2 trillion hydrogen trade,” 2022. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://hydrogencouncil.com/en/global-hydrogen-flows/

[56] International Energy Agency (IEA), “Global Hydrogen Review 2023,” 2023. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023

[57] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Part II – Technology Review of Hydrogen Carriers,” 2022. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/Global-hydrogen-trade-Part-II

[58] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor,” 2022. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen

[59] World Bank, “Hydrogen for Development Partnership (H4D),” 2023. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.worldbank.org/en/programs/hydrogen-for-development

[60] World Bank, “The Potential of Green Hydrogen in Latin America and the Caribbean: The Opportunities of a New Industry,” 2023. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/c9b55ff1-92ad-5e43-8322-1bbfcb22b6d6

[61] CEPAL, “Perspectivas del hidrógeno verde en América Latina y el Caribe,” 2022. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.cepal.org/es/publicaciones/47925-perspectivas-hidrogeno-verde-america-latina-caribe

[62] McKinsey & Company, “Hydrogen Insights 2023,” 2023. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/hydrogen-insights-2023

[63] BloombergNEF, “Global Hydrogen Outlook 2023,” 2023. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://about.bnef.com/blog/global-hydrogen-outlook-2023/

[64] International Energy Agency (IEA), “The Future of Hydrogen,” 2019. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen

[65] European Commission, “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe,” 2020. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301

[66] U.S. Department of Energy, “Hydrogen Program Plan,” 2020. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramplan2020.pdf

[67] Australian Government, “Australia’s National Hydrogen Strategy,” 2019. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf

[68] Government of Canada, “Hydrogen Strategy for Canada,” 2020. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://natural-resources.canada.ca/climate-change/canadas-green-future/hydrogen-strategy

[69] Government of Japan, “Basic Hydrogen Strategy,” 2017. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf

[70] Government of South Korea, “Hydrogen Economy Roadmap of Korea,” 2019. Accessed: Aug. 8, 2025. [Online]. Available: https://english.moef.go.kr/pc/selectTbPressCenterDtl.do?boardCd=N0001&seq=4752

[71] A. Power, "JIVE 1 has delivered 131 hydrogen-powered buses," Hydrogen Technology Expo North America (Industry News), 2 Aug. 2024. [Online]. Available: https://www.hydrogen-expo.com/industry-news/jive-1-delivered-131-hydrogen-powered-buses. [Accessed: 21 Aug. 2025].

[72] "Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (JIVE)," Clean Hydrogen Partnership (Project repository), European Commission, Jan. 1, 2017 – Dec. 31, 2022. [Online]. Available: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/jive_en. [Accessed: Aug. 21, 2025].

[73] Element Energy Limited, Hydrogen Mobility Europe (H2ME), Grant Agreement ID: 671438, European Commission Horizon 2020 — “SOCIETAL CHALLENGES – Smart, Green and

Integrated Transport," EC signature date 14 July 2015, start date 1 June 2015, end date 30 November 2020, DOI: 10.3030/671438.

[74] A. Osterwalder and Y. Pigneur, Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.

[75] Air Liquide, "Readiness for Olympic and Paralympic Games Paris 2024: Air Liquide hydrogen station located Place de…," *Air Liquide Press Releases*, Mar. 28, 2024. [Online]. Available: https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2024-03-28/readiness-olympic-and-paralympic-games-paris-2024-air-liquide-hydrogen-station-located-place-de. [Accessed: 19-Aug-2025].

[76] Toyota, "Toyota surpasses 3,000 Mirai hydrogen fuel cell vehicle sales in California," *Toyota Newsroom*, [Online]. Available: https://pressroom.toyota.com/toyota-surpasses-3000-mirai-hydrogen-fuel-cell-vehicle-sales-in-california/. [Accessed: 19-Aug-2025].

[77] WaterstofNet, "'3Emotion' project demonstration of hydrogen fuel cell buses," *WaterstofNet Projects*, [Online]. Available: https://www.waterstofnet.eu/en/projects/vehicles/3emotion. [Accessed: 19-Aug-2025].

[78] Novuna Vehicle Solutions, "Hydrogen fleet alternative fuel leasing," *Novuna Vehicle Solutions*, [Online]. Available: https://www.novunavehiclesolutions.co.uk/electric-fleet-solutions/alternative-fuel-leasing/hydrogen-fleet/. [Accessed: 19-Aug-2025].

[79] Air Liquide, "Air Liquide will build first high-pressure hydrogen refueling station for long-haul trucks in Europe," *Air Liquide Press Releases*, Jul. 1, 2020. [Online]. Available: https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2020-07-01/air-liquide-will-build-first-high-pressure-hydrogen-refueling-station-long-haul-trucks-europe. [Accessed: 19-Aug-2025].

[80] H2Chile, "Primer camión minero a hidrógeno verde es presentado en Sudáfrica por AngloAmerican," *H2Chile*, May 2022. [Online]. Available: https://h2chile.cl/2022/05/primer-camion-minero-a-hidrogeno-verde-es-presentado-en-sudafrica-por-angloamerican/. [Accessed: 19-Aug-2025].

[81] WaterstofNet, "Virya's hydrogen taxi pilot project completed—more infrastructure needed," *WaterstofNet News*, [Online]. Available: https://www.waterstofnet.eu/en/nieuws-enkel-voor-wic-leden/virya-s-hydrogen-taxi-pilot-project-completed-more-infrastructure-needed. [Accessed: 19-Aug-2025].

[82] MOVÉS Uruguay, "Programa MOVÉS – Promoviendo una movilidad sostenible." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://moves.gub.uy/

[83] Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, "Presentación de la guía de movilidad urbana eléctrica en Uruguay." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/presentacion-guia-movilidad-urbana-electrica-uruguay

[84] OIT/CINTERFOR, "Movilidad eléctrica en Uruguay: Informe nacional 2023." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/Uruguay-Informe_MovilidadElectrica_2023.pdf

[85] Universidad Católica del Uruguay, "Maestría en Ingeniería – Documento académico." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://carreras.ucu.edu.uy/aucdocumento.aspx?1478,2974

[86] UTE, "Movilidad eléctrica." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://movilidad.ute.com.uy/

[87] OLADE, "Movilidad eléctrica en Uruguay: Programa de incorporación de vehículos eléctricos." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.olade.org/publicaciones/movilidad-electrica-en-uruguay-programa-de-incorporacion-de-vehiculos-electricos/

[88] Gobierno de Uruguay, "Subite – Programa de incorporación de vehículos eléctricos." Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/tramites/subite-programa-incorporacion-vehiculos-electricos

[89] Dirección Nacional de Energía, “Instrumentos para la promoción de la movilidad eléctrica.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.eficienciaenergetica.gub.uy/transporte?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=4483635&_101_type=content&_101_urlTitle=instrumentos-para-la-promocion-de-la-movilidad-electrica&inheritRedirect=true

[90] Ministerio de Industria, Energía y Minería, “Hoja de ruta del hidrógeno verde en Uruguay.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/hoja-ruta-hidrogeno-verde-uruguay-0

[91] Ministerio de Industria, Energía y Minería, “Programa H2U.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programa-h2u

[92] Ministerio de Industria, Energía y Minería, “Aspectos de interés e instrumentos de promoción.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/aspectos-interes-instrumentos-promocion

[93] Banco Interamericano de Desarrollo, “Hidrógeno verde: Un paso natural para Uruguay hacia la descarbonización.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://publications.iadb.org/es/hidrogeno-verde-un-paso-natural-para-uruguay-hacia-la-descarbonizacion

[94] CCU, “Factores habilitantes para el desarrollo del hidrógeno en Uruguay.” Apr. 2024. Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.ccu.com.uy/wp-content/uploads/2024/04/Factores-habilitantes-para-el-desarrollo-del-hidrogeno-en-UY_20240410-sin-anexos.pdf

[95] H2LAC, “Conoce el proyecto H24U que se adjudicó US$10 millones para descarbonizar el transporte de carga pesada en Uruguay.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://h2lac.org/noticias/conoce-el-proyecto-h24u-que-se-adjudico-us-10-millones-para-descarbonizar-el-transporte-de-carga-pesada-en-uruguay/

[96] Ministerio de Industria, Energía y Minería, “Uruguay da importante paso hacia el desarrollo del hidrógeno verde.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/uruguay-da-importante-paso-hacia-desarrollo-del-hidrogeno-verde-concrecion

[97] Presidencia de Uruguay, “Uruguay ejecutará primer proyecto piloto para el desarrollo de hidrógeno verde.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/uruguay-ejecutara-primer-proyecto-piloto-para-desarrollo-hidrogeno-verde

[98] ICEX España, “Movilidad eléctrica e hidrógeno verde en Uruguay (actualización 2023).” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.icex.es/content/dam/es/icex/oficinas/081/documentos/2023/12/movilidad-el%C3%A9ctrica-e-hidr%C3%B3geno-verde-en-uruguay-(actualizaci%C3%B3n-2023)/OD_Movilidad%20el%C3%A9ctrica%20e%20hidr%C3%B3geno%20verde%20en%20Uruguay%202023_REV.pdf

[99] Presidencia de Uruguay, “Uruguay estudiará viabilidad de tren de hidrógeno para pasajeros en el área metropolitana.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/uruguay-estudiara-viabilidad-tren-hidrogeno-para-pasajeros-area-metropolitana

[100] Presidencia de Uruguay, “Gobierno firmó memorando de entendimiento para construir planta de hidrógeno verde.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/gobierno-firmo-memorando-entendimiento-para-construir-planta-hidrogeno-verde

[101] Informe técnico, “Evaluación del ciclo de vida de los vehículos eléctricos (hidrógeno y baterías).” Accessed: Jul. 25, 2025.

[102] Informe técnico, “Análisis del costo total de posesión (CTP) de los vehículos eléctricos y escenarios de penetración.” Accessed: Jul. 25, 2025.
[103] Informe técnico, “Hoja de ruta para el despliegue de infraestructura de recarga de hidrógeno.” Accessed: Jul. 25, 2025.
[104] Informe técnico, “Análisis del mercado global de hidrógeno verde (H2V) y el potencial de participación de Costa Rica.” Accessed: Jul. 25, 2025.
[105] Informe técnico, “Incentivos y obstáculos para la implementación del hidrógeno verde en Costa Rica.” Accessed: Jul. 25, 2025.
[106] Informe técnico, “Análisis de perspectivas y políticas públicas enfocadas al transporte público eléctrico modalidad autobús en Costa Rica (2018–2022).” Accessed: Jul. 25, 2025.
[107] ASOMOVE, “Indicadores de movilidad eléctrica en Costa Rica.” Accessed: Jul. 25, 2025. [Online]. Available: https://asomove.org/indicadores
[108] Agencia de Sostenibilidad Energética, “Taxis Eléctricos – Mi Taxi Eléctrico,” *Mi Taxi Eléctrico*, Chile, 2025. [Online]. Available: https://www.mitaxielectrico.cl/. [Accedido: 20-ago-2025].
[109] Mobility Portal Latinoamérica, “Chile incorpora 308 autobuses eléctricos al transporte ...,” *Mobility Portal Latinoamérica*, Jul. 17, 2025. [Online]. Available: https://mobilityportal.lat/chile-308-autobuses-electricos-4400-en-2026/. [Accedido: 20-ago-2025].
[110] HysetCo, “HysetCo – hydrogen mobility solutions,” _HysetCo_, France, 2025. [Online]. Available: https://www.hysetco.com/. [Accedido: 20-ago-2025].
[111] Hyundai Motor Company, “Hyundai Motor’s XCIENT Fuel Cell Trucks Achieve Record of 10 Million km Total Driving Distance in Switzerland,” *Newsroom – Press Releases*, Jun. 14, 2024. [Online]. Available: https://ecv.hyundai.com/global/en/newsroom/press-releases/hyundai-motors-xcient-fuel-cell-trucks-achieve-record-of-10-million-km-total-driving-distance-in-switzerland-BL00200524. [Accedido: 20-ago-2025].
[112] FuelCellsWorks, “Japan backs hydrogen powered commercial vehicles with major subsidies,” FuelCellsWorks, May 19, 2025. [Online]. Available: https://fuelcellsworks.com/2025/05/19/fuel-cells/japan-backs-hydrogen-powered-commercial-vehicles-with-major-subsidies. [Accedido: 20 ago 2025]
[113] Reuters, “US grants $750 million for hydrogen projects across 24 states,” Reuters, Mar. 13, 2024. [Online]. Available: https://www.reuters.com/business/energy/us-grants-750-million-hydrogen-projects-across-24-states-2024-03-13/. [Accedido: 20 ago 2025]
[114] U.S. Department of Energy, "Financial Incentives for Hydrogen and Fuel Cell Projects," Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2025. [Online]. Available: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/financial-incentives-hydrogen-and-fuel-cell-projects. [Accedido: 20-ago-2025].
[115] Ministerio de Energía de Chile, “Entra en vigencia nuevo estándar de eficiencia energética para vehículos livianos,” *Ministerio de Energía*, Feb. 12, 2024. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/noticias/nacional/entra-en-vigencia-nuevo-estandar-de-eficiencia-energetica-para-vehiculos-livianos. [Accedido: 20-ago-2025].
[116] M. Ríos, "Desde un megaproyecto de los Benetton hasta la producción de combustible para la aviación: estos son todos los proyectos de hidrógeno verde en el país," El Cronista, May 31, 2023. Accessed: Aug. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.cronista.com/negocios/desde-un-megaproyecto-de-los-benetton-hasta-la-produccion-de-combustible-para-la-aviacion-estos-son-todos-los-proyectos-de-hidrogeno-verde-en-el-pais/
[117] ECIT, "Estudio: Cadena de Valor del RH2 en Chile - Proveedores de bienes y servicios de la industria del hidrógeno renovable," Plan Nacional de Hidrógeno Verde, Feb. 2025. Accessed: Aug. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.planhidrogenoverde.cl/wp-content/uploads/2025/02/Estudio-ECIT-Cadena-de-Valor.pdf

[118] Planificación Operativa - Coordinación Diaria. Ministerio de Energía - Chile. (2025). Accessed: Aug. 22, 2025. [Online]. Available: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOWRiNmI5MmItZDk3MC00ZjIyLTg5ZTYtN2YxMmRmM2Y0NmM4IiwidCI6IjU0NDJkMDFkLTQ2YTItNDNmMi1iMDQ0LTJkMDhhZDNkOTllYyIsImMiOjR9

[119] "Costa Rica da el siguiente salto hacia la descarbonización con hidrógeno verde," H2LAC, Aug. 22, 2025. Accessed: Aug. 22, 2025. [Online]. Available: https://h2lac.org/noticias/costa-rica-da-el-siguiente-salto-hacia-la-descarbonizacion-con-hidrogeno-verde/

[120] M. Ríos, "México acelera su transición energética con 24 proyectos de hidrógeno verde," H2 News, Mar. 04, 2025. Accessed: Aug. 22, 2025. [Online]. Available: https://h2news.cl/2025/03/04/mexico-acelera-su-transicion-energetica-con-24-proyectos-de-hidrogeno-verde/

[121] "Proyectos de hidrógeno verde y derivados en Uruguay," Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2025. Accessed: Month Day, Year. [Online]. Available: https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/proyectos-hidrogeno-verde-derivados-uruguay

[122] World Bank Group, "Population density (people per sq. km of land area) | Data," The World Bank, [Online]. Available: https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST. [Accessed: 19-Aug-2025].

[123] Geo-Ref.net, "Geografía y densidad de población," [Online]. Available: http://www.geo-ref.net. [Accessed: 19-Aug-2025].

[124] M. F. Melo, “Ajuste de los salarios mínimos en Latinoamérica,” Statista, 15-Jul-2024. [Online]. Disponibl e en: https://es.statista.com/grafico/16576/ajuste-de-los-salarios-minimos-en-latinoamerica/ [Accessed: 21-Aug-2025].

[125] Servicio Nacional de Aduanas, “¿Cuáles son los impuestos que debo pagar al importar?”, Aduana.cl, 16-Nov-2020. [Online]. Available: https://www.aduana.cl/cuales-son-los-impuestos-que-debo-pagar-al-importar/aduana/2020-11-16/110804.html. [Accessed: 21-Aug-2025].

[126] Gosocket, “El IVA en Latinoamérica,” Gosocket.net, [Online]. Available: https://gosocket.net/centro-de-recursos/el-iva-latinoamerica/. [Accessed: 21 Aug 2025].

[127] Chubb Seguros, “Transporte y medios de transporte,” Chubb.com, [Enlace]. Disponible en: https://www.chubb.com/es-es/empresas/sector/transporte-y-medios-de-transporte.html. [Accedido: 21 Ago 2025].

[128] Molina, T. (2025, julio 10). “¿En qué posición está Chile?: Ranking de las cuentas de la luz más caras de Latinoamérica”. Emol. Recuperado de: https://www.emol.com/noticias/Economia/2025/07/10/1171845/cuentas-de-la-luz-latinoamerica.html

[129] Xe, “Conversor de divisas XE,” Xe.com, [Online]. Available: https://www.xe.com/es/currencyconverter/. [Accessed: 21 Aug 2025].

[130] Mirshafiee, F., Shahbazi, E., Safi, M., & Rituraj, R. (2023). "Predicting Power and Hydrogen Generation of a Renewable Energy Converter Utilizing Data-Driven Methods: A Sustainable Smart Grid Case Study". Energies, 16(1), 502. https://doi.org/10.3390/en16010502



Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Registered offices
Bonn and Eschborn, Germany

Friedrich-Ebert-Allee 32 + 36
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

E info@giz.de
I www.giz.de

El proyecto Desarrollo del Hidrógeno Renovable en Chile (RH2), es cofinanciado por la Unión Europea y el Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima de Alemania (BMWK), siendo implementado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y la Agencia Española de Cooperación Internacional al Desarrollo (AECID).

Transporte y Movilidad con H2 en la región LATAM para Red de aprendizaje RH2