



Seguridad operacional para la implementación de buses eléctricos a hidrógeno en el sistema RED



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE


swisscontact

CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact

Seguridad operacional para la implementación de buses eléctricos a hidrógeno en el sistema RED

Documento elaborado en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 2) financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE y ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico – Swisscontact

El presente documento es de carácter informativo y no necesariamente refleja los puntos de vista u opiniones de las organizaciones y gobiernos participantes.

Las denominaciones utilizadas y la presentación del material de esta publicación no implican en lo absoluto la expresión de ninguna opinión sobre el estatus legal de un país, territorio, ciudad o área, sobre sus autoridades.

Elaborado por:

Responsable

Dr. German Amador Diaz

Investigadores y Equipo Técnico

Dr. Roberto Leiva-Illanes
Dr. Mauricio Osses Alvarado
Dr. Antonio Sánchez Squella
MSc. Leonardo Bravo Oyanadel
Ing. Matias Delgado Urzua
Cand. MSc. Javier Cerda Alquinta
Cand. MSc. Ricardo Flores Reyes
Cand. MSc. Felipe Morales Flores
Ing. Cristián Folch Navarrete

Revisado y complementado por:

Rodrigo Tapia Saldívar - Gerencia de Operaciones y Mantenimiento del Directorio de Transporte Público Metropolitano
Franco Fuentes Rampoldi - Coordinador Local CALAC+
David Carrasco - Coordinador Transporte Urbano CALAC+
Adrián Montalvo Balarezo - Director Programa CALAC+

Foto de portada: Banco de Fotos Santiago de Chile / Estación de Buses – Programa CALAC+

Edición junio 2024.

Resumen

En el marco de la consultoría "Estudio recopilatorio de seguridad operacional para la implementación de buses a hidrógeno en el sistema RED" se llevó a cabo una búsqueda detallada de los protocolos, normativas técnicas, y documentos relacionados con los sistemas presurizados de hidrógeno, la seguridad operacional y la salud ocupacional a tener en consideración en la implementación de los buses eléctricos con celdas de combustible (FCEB) a hidrógeno que se incorporen en el sistema RED de la Región Metropolitana. El estudio abarcó las diversas fases de la operación de los FCEB, considerando desde la generación y almacenamiento del hidrógeno, su transporte y repostaje, así como el mantenimiento de los principales equipos y de los FCEB. La búsqueda de información se realizó tanto a nivel nacional, involucrando entidades como el Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Energía y la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, entre otras; como a nivel internacional, incluyendo organismos como el Departamento de Energía de Estados Unidos, la Asociación de Gas Comprimido de Estados Unidos, así como diversos programas federales y no gubernamentales de este país. Además, se revisaron entidades de la Unión Europea y en particular, entidades de Alemania. Finalmente, se identificaron los riesgos mediante la elaboración de una matriz de riesgos, así como la formulación de medidas de control y mitigación fundamentadas en normativas internacionales.

La revisión y sistematización de los protocolos y de las normas técnicas de seguridad muestran que las normativas internacionales existentes abarcan todas las etapas de la cadena de valor de los FCEB, por lo que la mayoría de estas normas se podrían homologar para ser utilizadas en Chile. Dentro de las normativas recomendadas, se recomienda priorizar la revisión de las normas NFPA 2, ISO 15916, ISO 19880-1, ISO 14687:2019, ASME B31.12, e ISO 26142, debido a la naturaleza transversal a las diferentes etapas de operación del FCEB a hidrógeno que estas poseen.

La matriz de riesgo revela que los fabricantes de FCEB juegan un rol clave para garantizar la seguridad de las personas y del bus durante su operación. En tal sentido, las especificaciones técnicas definidas para licitar la adquisición de los FCEB deben incluir exigencias en cuanto a las tecnologías y los protocolos de seguridad que permita implementar las medidas de control y mitigación propuestas. Por tal razón, se recomienda que la entidad encargada de gestionar la compra del FCEB considere fabricantes que cuenten con experiencia a nivel mundial; habiendo vendido y probado FCEB en distintas partes del mundo con, por lo menos, 3 años de operación continua.

Finalmente, el presente trabajo, propone un conjunto de recomendaciones transversales a las diferentes etapas de operación del FCEB, así como las diferentes líneas de estudios que deben ser consideradas para garantizar una operación segura a mediano y largo plazo de los FCEB.

Tabla de contenido

GLOSARIO.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 CONTEXTO	4
1.2 ANTECEDENTES	6
1.3 OBJETIVOS	7
1.4 ALCANCE DEL INFORME.....	7
2. GENERALIDADES	8
2.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	8
2.1.1 <i>Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno</i>	9
2.2 ESTACIONES DE REPOSTAJE DE HIDRÓGENO	10
2.3 BUSES ELÉCTRICOS CON CELDAS DE COMBUSTIBLE (FCEBs).....	14
2.3.1 <i>Comparativa de riesgos entre buses FCEB y BEV</i>	16
2.3.2 <i>Casos internacionales de uso de FCEB</i>	18
2.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LAS NORMAS, PROTOCOLOS, REGULACIONES, Y POLÍTICAS PARA LOS SISTEMAS PRESURIZADOS CON HIDRÓGENO Y LAS ETAPAS DE OPERACIÓN	21
3.2 MATRIZ DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL Y MITIGACIÓN EN CASO DE SINIESTRO O VANDALISMO	22
4. RESULTADOS	26
4.1 MANIPULACIÓN DE SISTEMAS PRESURIZADOS CON HIDRÓGENO	26
4.2 SEGURIDAD OPERACIONAL Y SALUD OCUPACIONAL EN EL USO DE BUSES A HIDRÓGENO	27
4.2.1 <i>Transporte del hidrógeno</i>	27
4.2.2 <i>Repostaje de hidrógeno en tanques de almacenamiento estacionario y repostaje de los buses</i>	28
4.2.3 <i>Operación de los buses</i>	30
4.2.4 <i>Mantenimiento de los equipos de generación, almacenamiento y repostaje</i>	31
4.2.5 <i>Mantenimiento de los Buses</i>	32
4.2.6 <i>Información Transversal a las Etapas de Operación</i>	33
4.3 RESUMEN DE NORMAS, REGULACIONES, POLÍTICAS, PROTOCOLOS Y PROCEDIMIENTOS.....	36
4.4 MATRIZ DE RIESGOS Y MEDIDAS DE CONTROL Y MITIGACIÓN	39
5. RECOMENDACIONES	52
5.1 LÍNEAS DE ESTUDIO	57
6. CONCLUSIONES	58
7. REFERENCIAS	60
ANEXO I.....	66
ANEXO II.....	85

Figuras

FIGURA 1: COMPOSICIÓN DE LAS EMISIONES AL AIRE A NIVEL NACIONAL POR TIPO DE FUENTE EN EL 2019 [2].	4
FIGURA 2: ESQUEMA DE UNA ESTACIÓN DE REPOSTAJE DE HIDRÓGENO [20].	11
FIGURA 3: DISPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DEL FCEB DE HIDRÓGENO [35].	15
FIGURA 4: ASPECTO DE SEGURIDAD RELACIONADOS CON FCEV [39].	17
FIGURA 5: PASOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO OPERACIONAL [34].	23
FIGURA 6: RESUMEN DE NORMATIVA ASOCIADA A SEGURIDAD DE ACUERDO CON LAS ETAPAS DE OPERACIÓN.	36
FIGURA 7: RESUMEN DE NORMATIVA SEGÚN CADENA DE VALOR DE HIDRÓGENO.	37
FIGURA 8: ESQUEMA SENSOR ELECTROQUÍMICO PARA DETECCIÓN DE HIDRÓGENO [107].	86

Tablas

TABLA 1: PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL HIDRÓGENO RELEVANTES PARA LA SEGURIDAD DE LOS VEHÍCULOS PROPULSADOS CON CELDAS DE COMBUSTIBLES.	10
TABLA 2: PRESIONES DE MANEJO PARA ESTACIÓN DE REPOSTAJE DE HIDRÓGENO [21], [22], [23], [24], [25], [26].	11
TABLA 3: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS ICEV, BEV, Y FCEV [36], [37].	16
TABLA 4: MATRIZ DEL CÓDIGO DE EVALUACIÓN DE RIESGO [53].	24
TABLA 5: PARÁMETROS DE LA MATRIZ DEL CÓDIGO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS [54].	24
TABLA 6: NORMAS, PROTOCOLOS O REGULACIONES EN MANIPULACIÓN DE SISTEMAS PRESURIZADOS CON HIDRÓGENO.	26
TABLA 7: NORMAS, PROTOCOLOS, REGULACIONES, POLÍTICAS O PROCEDIMIENTOS ENFOCADOS A SEGURIDAD OPERACIONAL Y/O SALUD OCUPACIONAL PARA EL TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO.	27
TABLA 8: NORMAS, PROTOCOLOS, REGULACIONES, POLÍTICAS O PROCEDIMIENTOS ENFOCADOS A SEGURIDAD OPERACIONAL Y/O SALUD OCUPACIONAL PARA EL REPOSTAJE DEL HIDRÓGENO EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO ESTACIONARIO Y REPOSTAJE DE LOS BUSES.	29
TABLA 9: NORMAS, PROTOCOLOS, REGULACIONES, POLÍTICAS O PROCEDIMIENTOS ENFOCADOS A SEGURIDAD OPERACIONAL Y/O SALUD OCUPACIONAL PARA LA OPERACIÓN DE LOS BUSES.	30
TABLA 10: NORMAS, PROTOCOLOS, REGULACIONES, POLÍTICAS O PROCEDIMIENTOS ENFOCADOS A SEGURIDAD OPERACIONAL Y/O SALUD OCUPACIONAL PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN, ALMACENAMIENTO Y REPOSTAJE.	32
TABLA 11: NORMAS, PROTOCOLOS, REGULACIONES, POLÍTICAS O PROCEDIMIENTOS ENFOCADOS A SEGURIDAD OPERACIONAL Y/O SALUD OCUPACIONAL PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS BUSES.	33
TABLA 12: NORMAS RELACIONADAS CON LA INDUSTRIA DEL HIDRÓGENO EN EL INN.	38
TABLA 13: RIESGOS EN CASO DE SINIESTROS O VANDALISMO SOBRE LOS BUSES EN SANTIAGO DE CHILE.	39
TABLA 14: MATRIZ DE RIESGO ASOCIADA A VANDALISMO O SINIESTRO.	40
TABLA 15: DISTRIBUCIÓN DE RIESGOS.	41
TABLA 16: RECOMENDACIONES RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD OPERACIONAL DE LOS FCEB FRENTE A LOS RIESGOS.	41
TABLA 17: PRINCIPALES NORMAS AUTOMOTRICES INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD DE LOS FCEB RECOMENDADOS [104].	53
TABLA 18: OEM RECOMENDADOS PARA LA ADQUISICIÓN DE BUSES A HIDRÓGENO.	54
TABLA 19: MODELOS DE FCEB MÁS UTILIZADOS EN EUROPA, EE.UU., JAPÓN, REPÚBLICA DE COREA Y CHINA [105].	54

Glosario

3CV	:	Centro de Control y Certificación Vehicular
AgenciaSE	:	Agencia de Sostenibilidad Energética
BEB	:	Battery Electric Buses (Buses eléctricos con baterías)
BEV	:	Battery Electric Vehicles (Vehículos eléctricos con baterías)
CEF	:	Connecting Europe Facility
CGA	:	Asociación de Gas Comprimido, EEUU
CHIC	:	Clean Hydrogen in European Cities
CINEA	:	European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency
CNE	:	Comisión Nacional de Energía, Chile
DOE	:	Departamento de Energía, EEUU
DTPM	:	Directorio de Transporte Público Metropolitano, Chile
ECE	:	Comisión Económica para Europa
EIGA	:	European Industrial Gases Association, Europa
EN	:	European Norm (European standarization)
FCEB	:	Fuell Cell Electric Buses (Buses eléctrico con celdas de combustible)
FCEV	:	Fuel Cell Electric Vehicle (Vehículo eléctrico con celdas de combustible)
FCH-JU	:	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
H2 Chile	:	Asociación Chilena de Hidrógeno
ICEV	:	Internal Combustion Engine Vehicles (Vehículos con motores de combustión interna)
IEC	:	International Electrotechnical Commission
INN	:	Instituto Nacional de Normalización
ISO	:	International Organization for Standardization
ITF	:	Foro Internacional de Transporte
MINENERGIA	:	Ministerio de Energía, Chile
MMA	:	Ministerio del Medio Ambiente, Chile
MTT	:	Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile
NFPA	:	National Fire Protection Association (USA)
NREL	:	Laboratorio Nacional de Energía Renovable, EEUU
OECD	:	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OEM	:	Original Equipment Manufacturer
OMS	:	Organización Mundial de la Salud
ORM	:	Gestión del Riesgo Operacional
OSHA	:	Occupational Safety and Health Administration (USA)
PHMSA	:	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (USA)
PM2.5	:	Material Particulado fino
PPDA RM	:	Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana
RAC	:	Código de Evaluación de Riesgos
RIC	:	Reglamento de Seguridad de las Instalaciones de Consumo de Energía Eléctrica (Chile)
SAE	:	Society of Automotive Engineers (USA)
SEC	:	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
UE	:	Unión Europea
UN Regulation	:	Union Nations Regulation (for transportation)

1. Introducción

1.1 Contexto

Los vehículos pesados son una importante fuente de emisiones de gases y partículas contaminantes en las ciudades debido a su alto nivel de actividad y el tipo de combustible que utilizan. En particular, los vehículos con motores diésel, cuyas emisiones han sido declaradas carcinogénicas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), tienen una contribución significativa en las emisiones de material particulado fino (PM2.5). A nivel mundial, se estima que el 25% de la contaminación del aire urbano procedente de PM2.5 proviene del tráfico [1], convirtiéndolo en el contaminante con el mayor impacto negativo en la salud de la población. En el contexto nacional, según se muestra en la Figura 1, en el año 2019 se registraron 126,930 toneladas de PM2.5, con la mayor contribución proveniente de la combustión de leña, seguida por los incendios forestales y quemaduras agrícolas. Por otro lado, el transporte en ruta, fuentes puntuales, e incendios forestales representan porcentajes menores [2]. Además, la contribución del sector transporte al total de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) alcanzó el 24% del total nacional, según el último Informe del Inventario Nacional de Chile de 2022 [3].

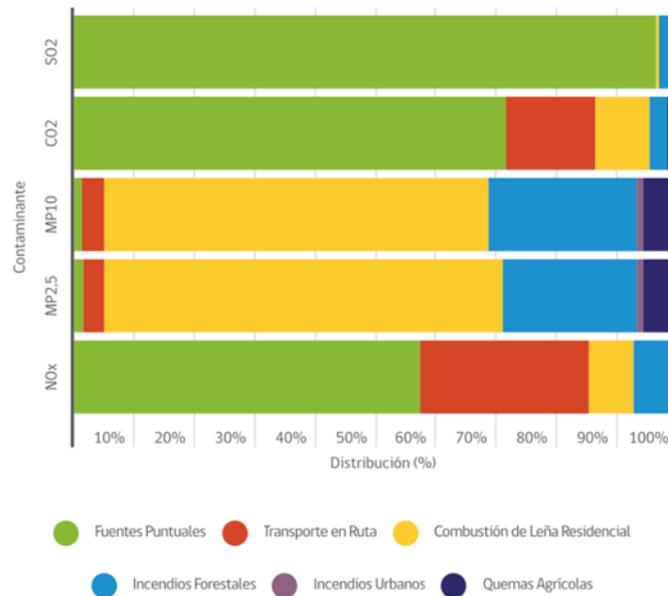


Figura 1: Composición de las Emisiones al Aire a Nivel Nacional por Tipo de Fuente en el 2019 [2].

En el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana, DS N°31/2017, se establecieron restricciones para el transporte público que circula por la Provincia de Santiago y en las comunas de San Bernardo y Puente Alto, lo que conllevó a implementar tecnologías más limpias a partir del 2019.

Chile busca cambiar la forma en que se produce y se consume energía por medio del uso de fuentes de energías renovables y la electrificación de la economía, incluyendo el transporte y la industria, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y así mitigar los efectos del cambio climático. En términos de política pública para lograr esta descarbonización, el Gobierno chileno presentó la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde [4], en el que se plasma la ambición que tiene Chile de ser líder mundial en la producción de hidrógeno verde. Esta estrategia tiene como objetivos principales producir el hidrógeno verde más barato del mundo para el 2030, estar entre los tres principales exportadores para el 2040 y contar con 5 GW de capacidad de electrólisis en desarrollo al 2025. Para contribuir al cumplimiento de estas metas, a nivel nacional, se han realizado esfuerzos en el ámbito industrial para generar capacidades de abastecimiento de hidrógeno y aportes por parte del estado, logrando que otros organismos se interesen en participar y apoyar los planes estratégicos, mediante la identificación de nuevas oportunidades de desarrollo tecnológico y económico.

Aunado a lo anterior, en línea con la transición energética a fuentes renovables, el Ministerio de Energía (MINENERGIA) de Chile presentó, en octubre del 2021, la Estrategia Nacional de Electromovilidad [5], que propone, en uno de sus ejes, que el 100% de las nuevas incorporaciones al transporte público urbano sean vehículos de cero emisiones para el 2035. En este contexto, el país ya presenta importantes avances en materia de movilidad sostenible, principalmente mediante el proceso de renovación de la flota de buses del Sistema de Transporte Público Urbano de Santiago, contando actualmente 7.000 buses como flota total, donde 35% son buses eléctricos a batería (2.481), 30% buses sustentables (que cumplen euro VI y otros) y 35% con tecnología más antigua en el sistema RED. Los vehículos eléctricos con celdas de combustible a hidrógeno (FCEV) son una alternativa atractiva de considerar para avanzar con la reducción de las emisiones contaminantes del sector transporte.

El Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) de Chile está trabajando en un proyecto piloto para el uso de hidrógeno verde en buses del transporte público del sistema RED. Si bien el proyecto piloto se enfoca en el hidrógeno verde, se están analizando todas las alternativas disponibles. Hasta la fecha, se ha diseñado el plan piloto, el cual establece los lineamientos de trabajo y las definiciones sobre cómo llevar a cabo el proyecto. En el marco del programa CALAC+, se ha realizado un estudio de evaluación técnico-económica para implementar una flota de buses a hidrógeno en el sistema de transporte metropolitano [6]. Este estudio ha permitido identificar los mejores recorridos para operar FCEB, considerando todas las opciones disponibles.

Si bien ya existen varias experiencias en el mundo con esta tecnología, la seguridad es un aspecto crítico para el desarrollo del piloto, teniendo en cuenta que a nivel nacional es la primera vez que se operará un vehículo pesado con estas características y que se tendrá un flujo considerable de personas durante su operación. A nivel mundial se han documentado esfuerzos en temas de seguridad, tal como la evaluación de seguridad de los vehículos de celdas de combustible de

hidrógeno y la elaboración del reglamento técnico mundial de las Naciones Unidas para los vehículos de hidrógeno y de celdas de combustible, publicado en el Foro Mundial para la Armonización de los Reglamentos sobre Vehículos (UNECE/WP. 29) [7]. Este establece que los vehículos impulsados por hidrógeno deben alcanzar o superar los niveles de seguridad de los vehículos convencionales a gasolina.

1.2 Antecedentes

Este informe recopila las regulaciones, protocolos, normativas, procedimientos y políticas en el marco de la consultoría "Estudio recopilatorio de seguridad operacional para la implementación de buses a hidrógeno en el sistema RED".

El propósito de este informe es ofrecer una guía normativa para proyectos de FCEB en Chile, centrada en la seguridad de proyectos de transporte público. Para ello, se realizó una exhaustiva recopilación, revisión, y clasificación de normas, protocolos internacionales pertinentes a sistemas presurizados con hidrógeno, seguridad operacional y salud ocupacional. Este estudio abarcó diversas etapas de operación de los buses a hidrógeno, desde la generación y almacenamiento hasta el transporte, repostaje y mantenimiento de equipos y vehículos. La búsqueda de información se llevó a cabo tanto a nivel nacional, considerando entidades como el Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Energía, la Agencia de Sostenibilidad Energética, la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, el Directorio de Transporte Público Metropolitano, la Asociación Chilena de Hidrógeno, el Instituto Nacional de Normalización, y el Clúster de Energía de GIZ Cono Sur, como a nivel internacional, revisando organismos como el Departamento de Energía de Estados Unidos, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos, el Laboratorio del Noroeste del Pacífico, la Asociación de Gas Comprimido de Estados Unidos, programas de capacitación nacionales federales y no gubernamentales de Estados Unidos, la Comisión Económica para Europa, Asociación Europea de Gas, el Foro Internacional de Transporte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego, la Comisión Internacional Electrotécnica, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos, Ballard, Sistema de Transporte Metropolitano de EEUU, el Ministerio Federal de Medio Ambiente, y la Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania.

Adicionalmente, se desarrolló una matriz de riesgos basada en la literatura e información recopilada, permitiendo identificar las principales fuentes de riesgo. Posteriormente, se propusieron medidas de control y mitigación basadas en normativas internacionales, especificando a los responsables de su implementación. Este enfoque busca proporcionar una orientación para garantizar la seguridad en todas las etapas de operación de los buses con celdas de combustible a hidrógeno en el contexto chileno.

1.3 Objetivos

El objetivo general es realizar un estudio recopilatorio de seguridad operacional para la implementación en buses eléctricos con celdas de combustible a hidrógeno en el sistema RED, evaluando y proponiendo mejoras de los aspectos técnicos comprendidos en el referido proceso.

Los objetivos específicos son:

- I. Realizar una revisión y sistematización de los protocolos y de las normas técnicas de seguridad operacional a nivel mundial que se han implementado para las diferentes etapas de operación de los buses eléctricos con celdas de combustible a hidrógeno, incluyendo la generación, el almacenamiento, el transporte y el repostaje del hidrógeno, así como el mantenimiento de los equipos y de los buses.
- II. Identificar normas mínimas que deben ser implementadas en Chile.
- III. Identificar los riesgos y las medidas de control y mitigación en caso de accidentes durante la operación de los buses eléctricos con celdas de combustible a hidrógeno, relacionado a los protocolos de seguridad recomendados y a los responsables de implementarlos.

1.4 Alcance del informe

El alcance del presente informe se divide en tres alcances claramente diferenciados por el tipo de actividades realizadas, a saber:

- I. Alcance I: Mapeo de normas internacionales relacionadas con los riesgos, consecuencias y acciones a tomar en relación con la manipulación de sistemas presurizados con hidrógeno, usando los criterios establecidos para su aplicación en el contexto de Chile.
- II. Alcance II: Mapeo de normas, protocolos, políticas y procedimientos internacionales relacionados con la salud ocupacional y la seguridad operacional en cada etapa de operación de los buses eléctricos con celdas de combustible a hidrógeno a considerar en el sistema RED. En el informe se diferencian las etapas de operación de los buses y la cadena de valor del hidrógeno, donde para cada una de ellas se resume el mapeo de normas, protocolos, políticas y procedimientos internacionales. Las etapas de operación corresponden a: transporte del hidrógeno; repostaje del hidrógeno en tanques de almacenamiento; repostaje de los buses; operación de buses; y mantenimiento tanto de equipos (generación, almacenamiento y repostaje) y de buses [6]. Por otro lado, se considera como cadena de valor del hidrógeno: generación de hidrógeno, transporte, almacenamiento, dispensado (repostaje), y uso final que se divide en operación de buses y en mantenimiento de equipos y buses.

- III. Alcance III: Elaboración de una matriz de riesgo vinculada a siniestros o vandalismo que pueda afectar el servicio de buses eléctricos con celdas de combustible a hidrógeno que operarán en Santiago. La matriz se centra en los riesgos asociados con la carga de hidrógeno en el terminal, la operación en entornos tanto abiertos como cerrados, y el mantenimiento de los buses. Se identifican los riesgos más relevantes y se recomiendan medidas de control y mitigación en base a normativas internacionales, y se indican los responsables encargados de implementar dichas medidas.

2. Generalidades

2.1 Producción de Hidrógeno

Existe una gran variedad de métodos para producir hidrógeno, los cuales se diferencian según sus procesos de producción y las emisiones de gases de efecto invernadero liberadas durante su producción. Las tres opciones más utilizadas son el “hidrógeno gris” (a base de combustibles fósiles), el “hidrógeno azul” (producción a base de combustibles fósiles con captura, utilización y almacenamiento de carbono) y el “hidrógeno verde” (a base de energías renovables). También existe el “hidrógeno turquesa” (producido mediante un proceso llamado pirólisis de metano) y el “hidrógeno rosa” (producido mediante electrólisis del agua, donde la electricidad es generada a través de energía nuclear en lugar de energías renovables) [8]. Sin embargo, el esquema de colores utilizado para el hidrógeno sugiere una caracterización de la ruta de producción, pero no proporciona una cuantificación de su efecto sobre las emisiones. Actualmente, no existen acuerdos internacionales sobre el uso de estos términos, lo que genera incertidumbre entre los diferentes actores involucrados. Por lo que regulaciones claras y sistemas de certificación basados en la intensidad de las emisiones de la producción de hidrógeno podría aportar transparencia en el mercado del hidrógeno. En esta línea, la comunidad europea ha establecido reglas para la producción de hidrógeno renovable, en orden a garantizar que el hidrógeno se produzca a partir de fuentes de energía renovables y logre al menos un 70% de ahorro en las emisiones de gases de efecto invernadero [9].

En el año 2022, la producción de hidrógeno a nivel mundial se obtuvo principalmente de gas natural (62%), carbón mineral (21%), y subproductos de hidrógeno (16%) [10]. La producción de hidrógeno desde electrólisis de agua es relativamente pequeña (menor a 0,1%), sin embargo, existe un interés creciente en el hidrógeno producido con electricidad proveniente de energías renovables dado que contribuye a la transición energética desplazando el uso de combustibles fósiles [10].

Se espera que la creciente demanda de hidrógeno en Chile impulse inversiones en métodos de producción sustentable de hidrógeno, abriendo la puerta a técnicas innovadoras.

2.1.1 Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno

Las propiedades físicas y químicas del hidrógeno están estrechamente relacionadas con su uso. Su manipulación está respaldada por más de 40 años de manejo seguro en diversas aplicaciones como la exploración espacial y procesos industriales. En su estado puro, el hidrógeno es inodoro, incoloro y sin sabor, por lo que una fuga puede ser imperceptible a la luz del día. La adición de metil mercaptano, ampliamente utilizado para detectar fugas de gas natural, no puede ser utilizado con hidrógeno dado que estos contienen sulfuros que pueden dañar las celdas de combustible [11]. Si bien el hidrógeno no es tóxico, en espacios cerrados y con fugas severas, puede causar deficiencia de oxígeno en el cuerpo humano (asfixia) debido a que el hidrógeno, por su alta difusividad, puede desplazar fácilmente el oxígeno presente en el aire.

El hidrógeno posee el peso atómico más bajo de las sustancias puras y, por lo tanto, tiene una baja densidad como gas y como líquido. De hecho, su razón de expansión es de 1:848, lo que implica que, en estado gaseoso a condiciones atmosféricas, el hidrógeno ocupa 848 veces el volumen de la misma masa en estado líquido. Esta propiedad del hidrógeno exige que, para su uso en vehículos propulsados con celdas de combustibles con una autonomía competitiva, deba de acudir a almacenamiento a altas presiones. El uso de tanques de almacenamiento a alta presión aumenta la probabilidad de fugas severas de hidrógeno, que, al entrar en contacto con el aire circundante, genera un ambiente potencialmente explosivo. El alto índice de deflagración del hidrógeno revela que es más explosivo que otros combustibles como el gas natural (metano) y la gasolina. Cabe resaltar que el hidrógeno posee un amplio rango de inflamabilidad; no obstante, su rápida difusividad y baja densidad en comparación con otros combustibles reduce la probabilidad de formar mezclas inflamables en entornos bien ventilados [12]. En todo caso, el diseño del sistema de suministro de combustible de los vehículos debe garantizar una correcta ventilación y poseer sensores de alerta temprana para evitar accidentes. Si bien la alta difusividad del hidrógeno ayuda a la correcta ventilación en caso de fuga, esta propiedad restringe el uso de materiales metálicos para el diseño de sistemas de almacenamiento a elevadas presiones. Se ha demostrado que materiales que entran en contacto con el hidrógeno en prologados periodos de tiempo, experimentan una degradación en la resistencia a la tensión y a la fatiga [13].

Por otro lado, si bien el hidrógeno tiene una alta temperatura de autoignición en comparación con el gas natural, la energía de ignición en mezclas estequiométricas es quince veces más baja que la del metano [8]. Como consecuencia de lo anterior, una leve descarga eléctrica estática de un cuerpo humano en condiciones secas, o incluso una chispa invisible podría causar una ignición. La Tabla 1, resume las propiedades físico- químicas más relevantes que tienen relación directa con los protocolos de seguridad que deben ser implementados en vehículos propulsados con celdas de combustibles alimentados con hidrógeno.

Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno relevantes para la seguridad de los vehículos propulsados con celdas de combustibles.

Propiedad	Unidades	Hidrogeno	Metano	Gasolina	Ref.
Densidad	kg/m ³	0.09	0.7-0.9 ¹	737	[14]
Energía de ignición	mJ	0.018	0.280	0.250	[15]
Temperatura de autoignición	°C	550	632	440	[8]
Límite de flamabilidad en aire	vol %	4.0-75	5.3-15	1.0-7.6	[15]
Límite de explosividad en aire	vol %	13-65	6.3-13.5	1.1-3.3	[15]
Índice de deflagración	bar-m/s	550	55	100-150	[15]
Coefficiente de difusión en aire	cm/s	0.61	0.16	0.05	[15]

2.2 Estaciones de Repostaje de Hidrógeno

Las estaciones de repostaje de hidrógeno desempeñan un papel crucial en la infraestructura destinada a los FCEV. La capacidad de suministro puede variar, desde 100 kg/día hasta 1000 kg/día [16], donde los componentes funcionales básicos de estas estaciones son similares. Ya sea que el hidrógeno se genere en el lugar o se entregue como gas o líquido, y sin importar la ubicación de la estación, se mantienen similitudes en el diseño con el propósito de proporcionar a los operadores de FCEV una experiencia de recarga similar a la de la gasolina o el diésel.

Estas estaciones pueden integrarse en instalaciones de carga existentes [17], [18], [19], como estaciones de gasolina o gas natural comprimido, o desarrollarse como proyectos independientes; por ejemplo, en aplicaciones de montacargas o, como en el caso presente, para buses a hidrógeno. El objetivo fundamental es que los operadores vivan un proceso de recarga que les resulte familiar en términos de operación del dispensador y tiempo de llenado, contribuyendo así a la aceptación generalizada de los FCEV.

¹ Esta densidad corresponde a la densidad promedio del gas natural

A pesar de su apariencia familiar y su ubicación conveniente, las estaciones de hidrógeno presentan notables diferencias técnicas respecto a las estaciones de gasolina y diésel. Para suministrar hidrógeno gaseoso, se requiere equipos de almacenamiento a alta presión, compresión, enfriamiento y control de temperatura que deben cumplir con las especificaciones y medidas de seguridad establecidas. La Figura 2 proporciona un esquema que ilustra el diseño de una estación de repostaje de hidrógeno en estado gaseoso. En cuanto al suministro de hidrógeno a esta estación, existen tres alternativas: producción in-situ, transporte mediante gasoductos, y transporte a través de camiones.

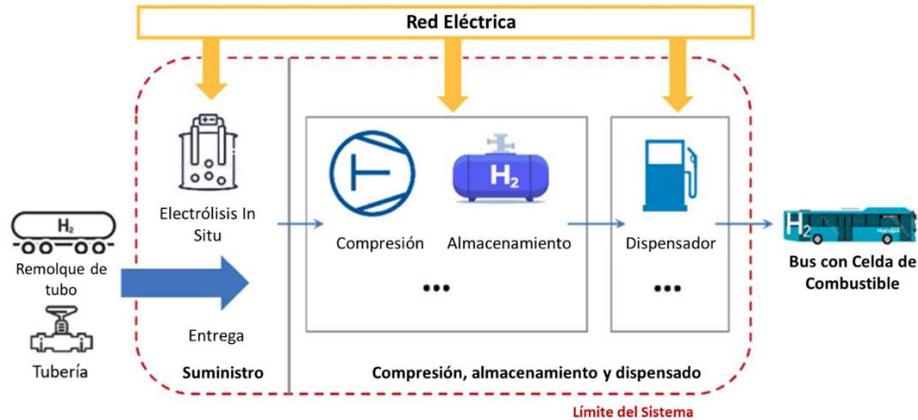


Figura 2: Esquema de una estación de repostaje de hidrógeno [20].

Los rangos de presiones que emplean los diversos componentes de una estación de repostaje se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Presiones de manejo para estación de repostaje de hidrógeno [21], [22], [23], [24], [25], [26].

Sección	Presiones de Manejo
Producción	10 - 70 bar
Compresión donde se produce	200-900 bar
Transporte	Líquido o a presión (150-500) bar
Dentro de la estación de repostaje	Distintas presiones, 150, 400 y/o 900 bar
Uso on-board	Vehículos livianos 700 bar y vehículos pesados 350 bar

A continuación, se presentan los procesos mínimos que posee una estación de repostaje de hidrógeno.

- I. Abastecimiento de estaciones de repostaje: Para cargar hidrógeno en las estaciones, hay dos opciones disponibles. Una de ellas implica adquirir el gas desde una planta productora y luego transportarlo hacia los depósitos de cada estación. En la segunda

alternativa se produce el hidrógeno en el mismo lugar a través de un electrolizador. A continuación, se profundiza cada opción.

- a. Transporte: La entrega de hidrógeno gaseoso se realiza comúnmente a través de camiones o mediante gasoductos. Debido a que el hidrógeno gaseoso se produce a presiones relativamente bajas (hasta 70 bar), es necesario comprimirlo antes de su transporte. Los camiones que transportan hidrógeno gaseoso se denominan “tube trailers”. El hidrógeno gaseoso se comprime a presiones de 180 bar (~2,600 psig) o superiores en cilindros largos apilados en el remolque que el camión transporta [27], lo que le da la apariencia de tubos largos, de ahí el nombre. También es posible transportar el hidrógeno gaseoso a través de gasoductos, de manera similar al gas natural en la actualidad, siendo común para el transporte a largas distancias y en grandes volúmenes. La mayoría de los gasoductos existentes se instalan en refinerías de petróleo, ya que el hidrógeno se utiliza en el proceso de mejora del petróleo. Ambos métodos, camiones y gasoductos, desempeñan un papel crucial en la cadena de suministro del hidrógeno, asegurando su llegada a diversos destinos de manera segura y eficiente.
 - b. Producción in-situ con electrolizadores: La producción de hidrógeno mediante electrolizadores implica el uso de electricidad para generar hidrógeno gaseoso a través de la descomposición de moléculas de agua en sus elementos constituyentes: hidrógeno y oxígeno. Uno o más sistemas de electrolizadores empaquetados, que requieren pequeñas cantidades de agua como alimentación, son impulsados por diversas configuraciones de suministro eléctrico. Esto puede incluir la conexión directa a la red eléctrica, siendo fundamental aprovechar los acuerdos de compra de energía renovable, y/o la conexión directa a paneles solares o generadores eólicos. Este enfoque busca lograr una producción descentralizada y sostenible de hidrógeno.
- II. Compresión: el hidrógeno se desplaza desde el abastecimiento de baja presión hacia el compresor de alta presión, donde experimenta una reducción de volumen y un aumento de presión. Este proceso acondiciona el hidrógeno para su suministro a presiones de 350 o 700 bar. En estaciones de gran capacidad, se incorporan múltiples compresores para gestionar eficientemente el flujo de hidrógeno. Además, cada tipo de estación cuenta con sistemas de monitoreo en tiempo real y dispositivos de alivio de presión, asegurando un control preciso y seguro del proceso. El alivio de presión se refiere al proceso de liberación controlada de hidrógeno a la atmósfera cuando la presión interna del compresor excede los límites predefinidos. Este sistema de seguridad es esencial para evitar operar a presión peligrosa dentro del compresor, lo que podría causar fugas, rupturas o explosiones. Los sistemas de alivio de presión deben ser regulados y mantenidos periódicamente para asegurar su funcionamiento. Además, el entorno

donde se opera el compresor debe estar bien ventilado y se deben tomar las medidas necesarias para evitar la acumulación de hidrógeno en concentraciones peligrosas cuando se active el sistema de alivio de presión del compresor.

- III. Almacenamiento de hidrógeno en la estación: todas las estaciones de suministro almacenan hidrógeno en estado gaseoso, con la fuente del gas variando entre suministro gaseoso o líquido. En el caso de estaciones más grandes, con un despacho superior a 1000 kg/día, el hidrógeno puede almacenarse en forma criogénica en tanques de doble pared con aislamiento al vacío, permitiendo su gasificación posterior. Por otro lado, algunas estaciones pueden recibir la entrega de gas mediante la recarga desde un remolque tubular a una presión más elevada. Cada estación está equipada con cilindros de hidrógeno comprimido a alta presión para el despacho directo a los vehículos. Es esencial destacar que todos los recipientes de almacenamiento están fabricados con materiales compatibles con el hidrógeno, según especifican las normas NFPA 2 [28], ISO 15916 [29] y ISO 19880- 1 [30]. Además, los sistemas de almacenamiento incluyen dispositivos de seguridad redundantes, tales como sistemas de alivio de presión y temperatura, así como sistemas de purga segura, garantizando así un entorno operativo seguro y confiable.
- IV. Enfriador: previo a su dispensación, el hidrógeno suele ingresar a un sistema de enfriamiento de bucle cerrado, donde se enfrían las moléculas a una temperatura predeterminada, adecuada para el protocolo de suministro específico utilizado en la estación [31]. Este sistema de enfriamiento cumple la función de compensar el calor de expansión, posibilitando así llenados rápidos y eficientes. Es importante resaltar, que el hidrógeno tiene coeficientes de Joule-Thomson negativos a diferentes presiones y temperaturas, por lo que, en el proceso de expansión, el gas incrementa su temperatura en la zona de menor presión [32].
- V. Dispensador: los dispensadores de hidrógeno están diseñados con la intención de presentar similitudes visuales y funcionales con los dispensadores convencionales de gasolina, gas natural comprimido o diésel. En el proceso de repostaje, el operador posiciona la boquilla del dispensador en la entrada del depósito de combustible del FCEV, aprieta el gatillo y bloquea la palanca en la posición de "llenado". En este punto, el dispensador asume la gestión del proceso de llenado, y una vez completado, el operador retira la boquilla para proceder a retirarse del lugar. Este diseño y procedimiento familiar contribuyen a una transición suave y accesible para los operadores de vehículos de celdas de combustible.

Es importante por mencionar que las estaciones de repostaje de hidrógeno también se pueden clasificar como hidrolineras o hidrogeneras. Las hidrolineras son estaciones de servicio especialmente diseñadas para proporcionar hidrógeno como combustible para vehículos de

hidrógeno. Funcionan de manera similar a las estaciones de servicio convencionales de gasolina o diésel, pero en lugar de dispensar combustibles fósiles, suministran hidrógeno gaseoso o líquido a los vehículos equipados con celdas de combustible de hidrógeno. Las hidrolíneas pueden estar ubicadas en áreas urbanas, en las carreteras o en áreas estratégicas para permitir la movilidad de los vehículos de hidrógeno. Por su parte, las hidrogeneras son las instalaciones donde se produce, almacena y distribuye hidrógeno. Esto puede incluir tanto las estaciones de servicio específicas para vehículos de hidrógeno (hidrolíneas) como otras instalaciones industriales o comerciales donde se manipula el hidrógeno para diversos fines. Las hidrogeneras pueden incluir plantas de producción de hidrógeno, instalaciones de almacenamiento y transporte, así como estaciones de recarga y suministro para vehículos de hidrógeno.

Ambas infraestructuras son esenciales para el desarrollo y la expansión de la economía del hidrógeno y la movilidad basada en este combustible.

2.3 Buses Eléctricos con Celdas de Combustible (FCEBs)

La búsqueda de alternativas al uso de combustibles fósiles en motores de combustión interna ha llevado a la investigación de diversas opciones, siendo una de ellas el uso de hidrógeno en celdas de combustible. En este contexto, se observa la adopción de Vehículos Eléctricos con Celdas de Combustible (FCEV) o más específico Buses Eléctricos con Celdas de Combustible (FCEB por sus siglas en inglés) en el transporte público, lo que constituye un hito que podría disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero generados por el sector del transporte [33], [34].

En el contexto específico del sistema de transporte público en la región metropolitana, se está explorando con diversas tecnologías eléctricas, incluyendo buses que utilizan solamente baterías (BEB Battery Electric Buses) y/o buses FCEB. La diferencia principal entre las tecnologías BEB y FCEB radica en cómo se almacena la energía en el vehículo y como se suministra la electricidad al motor eléctrico. Los BEB dependen exclusivamente de la energía almacenada y suministrada por su sistema de baterías de alto voltaje. Por otro lado, los FCEB almacenan energía en forma de hidrógeno para su conversión en electricidad a través de celdas de combustible mediante una reacción electroquímica. Una ventaja significativa que presentan los FCEB es poder contar con un sistema de baterías complementario. Este sistema se emplea principalmente para captar energía generada por el freno regenerativo y proporcionar energía adicional en momentos de alta demanda. Tanto los BEB como los FCEB tienen un sistema eléctrico de alta tensión, el cual está formado por baterías de alta tensión (de potencia o de tracción), sistema de control electrónico, y el tren de potencia eléctrico, además, puede contar con supercondensadores. En la Figura 3, se ilustra un FCEB.

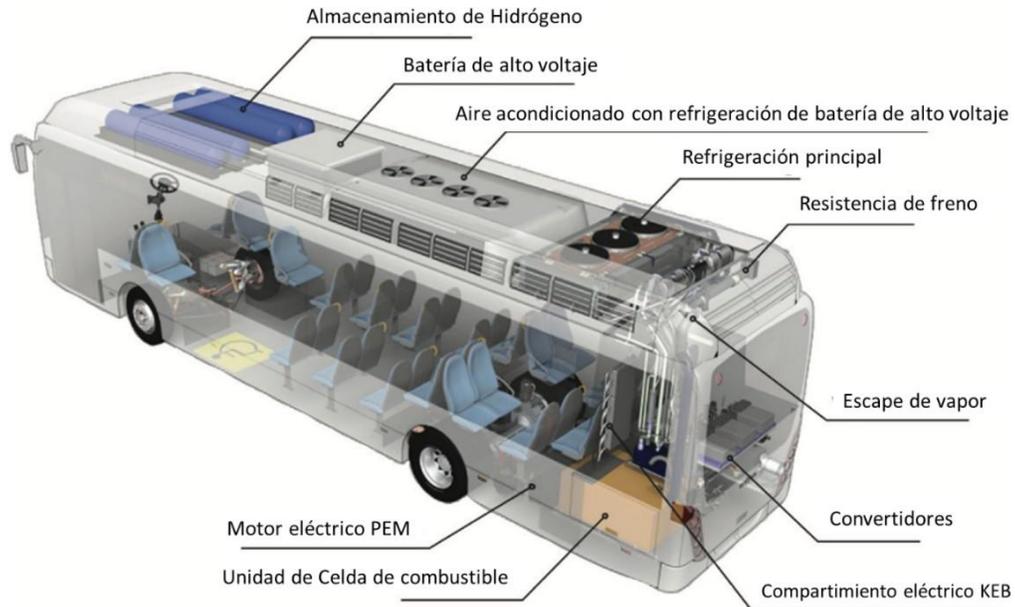


Figura 3: Disposición de los componentes del FCEB de hidrógeno [35].

En la actualidad, la preferencia por la adquisición de BEB ha ido en aumento; no obstante, se presentan desafíos al intentar llevar a cabo implementaciones a mayor escala [35]. Por ejemplo, la autonomía podría resultar insuficiente para ciertas rutas y ciclos de trabajo, lo que implica que algunas de las actuales rutas y horarios de transporte público no podrían ser atendidas mediante esta tecnología [6]. Por estas razones, los FCEB pueden sustituir directamente a los buses BEV y buses ICEV (Internal Combustion Engine Vehicles, vehículos con motores de combustión interna) en términos de autonomía, potencia y capacidad de pasajeros. Los FCEB ofrecen las siguientes características [35]:

- Rango (autonomía) similar a los buses diésel (más de 450 km), sin necesidad de cambios en rutas u horarios existentes.
- Potencia continua mientras el bus está en funcionamiento, para un rendimiento constante a lo largo de un turno.
- Mantiene rendimiento en ascensos y carga, incluso bajo temperaturas extremas.
- Sistema ligero de almacenamiento de hidrógeno para una capacidad máxima de pasajeros.
- Repostaje compacto en el depósito.
- Repostaje rápido respecto a los BEV.

La **Tabla 3** presenta una comparación de las tecnologías ICEV, BEV y FCEV mencionadas previamente.

Tabla 3: Comparación de tecnologías ICEV, BEV, y FCEV [36], [37].

Característica	ICEV	BEV	FCEV
Autonomía	Alta	Baja	Alta
Tiempo de reabastecimiento	Rápido (minutos)	Lento (horas)	Rápido (minutos)
Infraestructura de carga	Existente	Limitada	Inexistente
Dependencia del petróleo	Alta	Baja (depende del origen de la electricidad)	Baja (depende del origen del hidrógeno)
Emisiones de GEI	Alto	Baja (depende del origen de la electricidad)	Bajo (depende del origen del hidrógeno)
Impacto ambiental de las baterías	Bajo	Alto	Medio

2.3.1 Comparativa de riesgos entre buses FCEB y BEV

Los buses BEV, en su mayoría, dependen de baterías de ion-litio para su funcionamiento. Aunque estas son eficientes, conllevan riesgos significativos, como el sobrecalentamiento y la posibilidad de incendios térmicos, que pueden causar daños estructurales o fallos en el sistema de gestión de baterías. Además, el alto voltaje del sistema implica un riesgo eléctrico considerable, que requiere medidas de seguridad como un aislamiento adecuado, sistemas de desconexión automática y protocolos de emergencia para prevenir accidentes.

Por otro lado, los FCEB utilizan hidrógeno que es altamente inflamable, lo que plantea desafíos únicos en términos de almacenamiento y manipulación. El principal riesgo es la fuga de hidrógeno, que, al mezclarse con el aire, puede formar mezclas explosivas y asfixiantes. La detección temprana, sistemas de contención robustos y una ventilación adecuada son esenciales para mitigar este riesgo. Además, la operación de las celdas de combustible genera altas temperaturas, lo que requiere sistemas efectivos de gestión térmica para evitar sobrecalentamientos y garantizar un rendimiento seguro.

En cuanto a las medidas de seguridad, los buses BEV han evolucionado para incluir tecnologías avanzadas de gestión térmica y eléctrica, así como sistemas de alerta temprana y protocolos de evacuación rápida en caso de emergencia. Por otro lado, los FCEB, al ser una tecnología más reciente, están en proceso de integrar las lecciones aprendidas de los BEV y desarrollar nuevas estrategias adaptadas a las características del hidrógeno. Esto incluye sistemas de ventilación especializados, materiales retardantes de llama para el almacenamiento de hidrógeno y capacitación específica para los operadores sobre el manejo seguro del combustible.

En cuanto a las normativas, los buses BEV están sujetos a estándares que abarcan desde la seguridad de las baterías hasta la integridad estructural del vehículo. Las regulaciones para los FCEB incluyen las normas de los BEV y además estándares de seguridad del hidrógeno con pruebas específicas de resistencia al fuego, sistemas de detección de fugas, y la integridad de los tanques de hidrógeno bajo diversas condiciones operativas.

Se han identificado cinco áreas principales de investigación en seguridad de celdas de combustible [38], las cuales son:

- Seguridad de electrodos y catalizadores
- Seguridad de vehículos eléctricos con celdas de combustible
- Seguridad del hidrógeno
- Seguridad en la generación y almacenamiento de energía
- Seguridad de celdas de combustible de óxido sólido

Los problemas de seguridad relacionados a los FCEB se dividen en seguridad del hidrógeno y seguridad eléctrica, como se muestra en la Figura 4. En el primer caso, están los riesgos derivados del uso de hidrógeno los cuales abarcan desde fugas hasta explosiones catastróficas, mientras que, en el segundo caso, están los eventos relacionados a seguridad eléctrica, electrónica, y aislamiento eléctrico. Estos están cubiertos por las normativas asociadas a los BEV y FCEB.

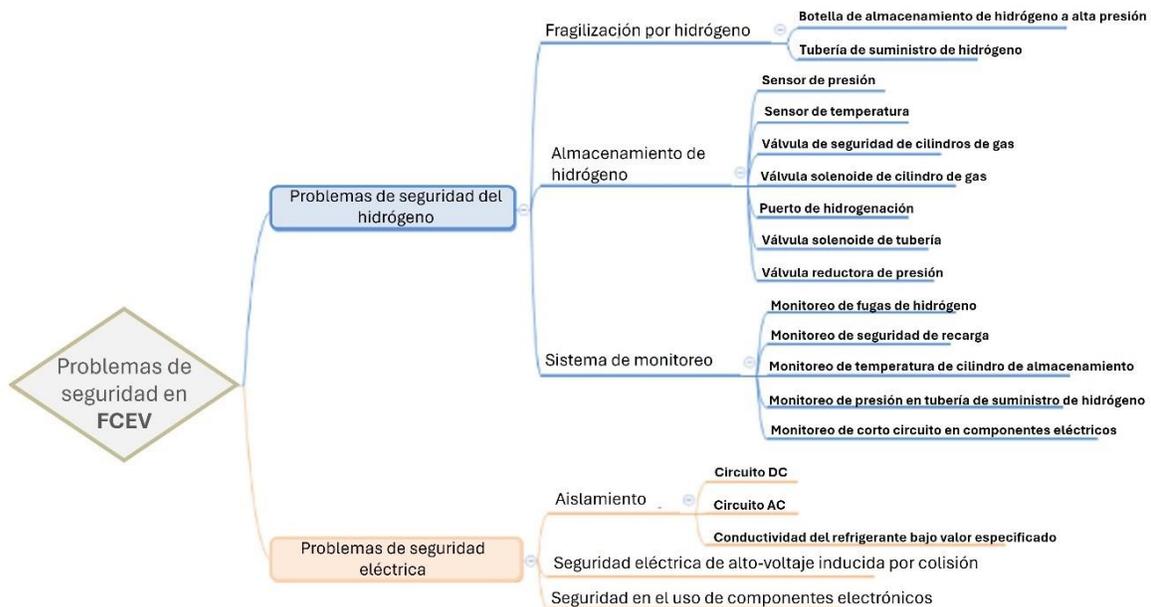


Figura 4: Aspecto de seguridad relacionados con FCEV [39].

En resumen, aunque los FCEV y BEV ofrecen alternativas más limpias y sostenibles comparados con los ICEV, cada uno presenta un conjunto específico de riesgos que deben ser considerados. La implementación efectiva de tecnologías de seguridad, junto con un marco regulatorio adecuado y la formación continua de los operadores, permiten garantizar la operación segura de los buses.

2.3.2 Casos internacionales de uso de FCEB

A continuación, se presenta las principales experiencias internacionales en el uso de FCEB.

En Estados Unidos, California cuentan con un historial de millones de millas en servicio de FCEB durante las últimas dos décadas, donde estos buses han demostrado un rendimiento constante a lo largo de extensos ciclos diarios de conducción, enfrentando todas las estaciones del año y en geografías desafiantes [35].

En Europa hay varios proyectos donde se han probado los FCEB. A continuación, se detallan nueve proyectos:

- I. Clean Hydrogen in European Cities (CHIC) [40]: proyecto emblemático de buses cero emisiones que desplegó una flota de FCEB y estaciones de repostaje de hidrógeno en ciudades de toda Europa y en Canadá desde 2010 hasta 2016. Cofinanciado por Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU), demostró la viabilidad de los FCEB en las ciudades, mejorando la calidad de aire y reduciendo los niveles de ruido. 54 buses operaron en diversas ciudades, mostrando su funcionalidad y flexibilidad en comparación con los buses ICEV diésel.
- II. High V.LO-City [41]: se desarrolló entre el 2012 al 2019. Tenía como objetivo desplegar 14 FCEB y estaciones de repostaje de hidrógeno en toda Europa. Los objetivos del proyecto incluyeron mejorar la eficiencia energética, reducir los costos de suministro de hidrógeno y lograr una disponibilidad operativa equivalente a la de los buses ICEV diésel. Fue financiado por la FCH-JU con el objeto contribuir a la comercialización de FCEB en Europa.
- III. HyTransit [42]: Proyecto respaldado por la FCH-JU, comenzó en 2013 y se extendió hasta finales de 2018. Con el objetivo de contribuir a la comercialización de FCEB en Europa, se introdujo una flota de 6 buses híbridos FCEV en servicios diarios en Aberdeen (Escocia), junto con una infraestructura de producción y repostaje de hidrógeno. El proyecto demostró la capacidad de los FCEB para igualar el rendimiento operativo de un bus ICEV equivalente en rutas interurbanas exigentes, superando considerablemente su rendimiento medioambiental. El despliegue de los buses y la infraestructura de hidrógeno en Aberdeen constituyen uno de los mayores proyectos de buses de hidrógeno en Europa.

- IV. Environmentally friendly Efficient Electric Motion (3Emotion) [43]: abarcando desde 2015 hasta 2022, el proyecto impulsó el despliegue de FCEB en Europa. Introdujo 21 buses nuevos y continúa utilizando 8 FCEB en 5 sitios, operados por 7 operadores de transporte. El proyecto tuvo como objetivo informar a los tomadores de decisiones sobre la integración rentable, mejoras técnicas, estándares de seguridad y estrategias de incentivos.
- V. NewBusFuel [44]: proyecto financiado por FCH-JU, abordó las lagunas de conocimiento en el repostaje de hidrógeno a gran escala para FCEB. Comenzando en 2015, evaluó la tecnología para repostar muchos buses en un solo depósito, enfrentando desafíos como la escala, disponibilidad, tiempos cortos de repostaje, almacenamiento de hidrógeno e implicaciones de costos para precios competitivos del combustible.
- VI. Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (JIVE) [45]: el proyecto tuvo como objetivo desplegar 131 FCEB y la infraestructura de repostaje en 4 países durante un periodo de 7,5 años a partir del 2017. Cofinanciado por el Clean Hydrogen Partnership, buscó avanzar en la comercialización de FCEB para el transporte público sostenible sin subsidios, promoviendo la contratación conjunta, la validación operativa, la reducción de costos y la fiabilidad de las estaciones de repostaje de hidrógeno.
- VII. Mehrlin [46]: este proyecto desplegó 7 estaciones de repostaje de hidrógeno para flotas de buses en ciudades de toda Europa desde el 2016 hasta 2023, incluyendo Reino Unido, Países Bajos, Italia y Alemania. Financiado en parte por el Connecting Europe Facility de la Comisión Europea y gestionado por la European Climate, Infraestructure and Environment Executive Agency, tuvo como objetivo demostrar un modelo de negocio financiable para estas estaciones y proporcionar datos sobre su rendimiento técnico y económico.
- VIII. JIVE 2 [47]: El proyecto JIVE 2 tiene como propósito implementar 157 autoFCEB de cero emisiones y la infraestructura de repostaje correspondiente en 12 ciudades europeas. Con una duración de 7.5 años desde el 2018, cuenta con la cofinanciación de la Clean Hydrogen Partnership, en el marco del programa Horizon 2020 de la Unión Europea. JIVE 2 amplió el proyecto JIVE, y en conjunto desplegarán casi 300 FCEB en 22 ciudades europeas, constituyendo el mayor despliegue hasta la fecha. Los objetivos generales de los proyectos JIVE y JIVE 2 son promover la comercialización de los buses con FCEV a gran escala, de manera que al final del proyecto estos vehículos sean económicamente viables para los operadores, y que los gobiernos locales y nacionales se sientan capacitados para regular la propulsión con cero emisiones en sus sistemas de transporte público.
- IX. H2Bus Europe [48]: El consorcio H2Bus, formado por Everfuel, Wrightbus, Ballard Power System, Hexagon Composites, Nel Hydrogen y Ryse Hydrogen, se comprometieron a

desplegar 1000 FCEB en ciudades europeas a tarifas competitivas. La primera fase, desplegó 600 buses en Dinamarca, Letonia y el Reino Unido para 2023. La oferta incluye suministro de hidrógeno verde, mantenimiento y despliegue de FCEB.

Finalmente, China destaca en el desarrollo del hidrógeno, inicialmente centrado en el transporte desde principios del 2000. El país desplegó 8,400 vehículos FCEV a finales del 2020, ubicándose tercero a nivel mundial [49]. China proyectó 50,000 vehículos y 300 estaciones de repostaje para 2025, y un millón de vehículos y mil estaciones para 2030 en su hoja de ruta de tecnología de FCEV [50]. Se prevé una expansión significativa en la infraestructura de repostaje, con dos mil unidades para 2035. La ciudad de Shanghai lidera la implementación de FCEB en China [41], seguida por Foshan con 115 unidades [51]. Otras ciudades como Zhangjiakou y Nanyang también avanzan en esta tecnología, con 100 y 72 unidades respectivamente [51]. Beijing y Jiaying han desplegado 150 unidades cada uno [51]. Estos buses se probaron en varias ciudades como parte de los preparativos para los Juegos Olímpicos de Invierno de Beijing 2022 [51]. Además, Xiamen Golden Dragon recibió un pedido de 100 FCEB para 2020 [51].

2.4 Operación y Mantenimiento

La operación se refiere a las actividades necesarias para el funcionamiento adecuado de un equipo, sistema, o infraestructura, tales como la conducción del bus, el repostaje de combustible, y el llenado de tanques de almacenamiento en estaciones. Las decisiones en operaciones buscan maximizar la eficiencia y la efectividad en el uso de los recursos disponibles para alcanzar los objetivos establecidos. El mantenimiento por su parte se refiere a las actividades destinadas a conservar, reparar o restaurar un equipo, sistema, o infraestructura en condiciones óptimas de funcionamiento. El mantenimiento se realiza para garantizar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad del sistema a lo largo del tiempo. Las decisiones en mantenimiento buscan minimizar el tiempo de inactividad, los costos y los riesgos producto de fallas. En el caso de un bus FCEV, el mantenimiento de los sistemas eléctricos de alta tensión, así como de los sistemas de hidrógeno son críticos pues implica un alto riesgo. El mantenimiento requiere de personal capacitado en mecánica automotriz, electromovilidad (que incluye equipos de alta tensión y de hidrógeno), tecnologías de celdas de combustible, diagnóstico, inspecciones, reemplazo de componentes específicos, y seguridad. De forma análoga, las estaciones de repostaje de hidrógeno demandan del mismo modo un mantenimiento riguroso. Los sistemas de bombeo, almacenamiento y canalización deben someterse a inspecciones de manera regular previniendo así las fugas y/o sobrepresiones, garantizando la seguridad. La colaboración entre los operadores de buses, proveedores de tecnología y responsables de las hidrolíneas. Lo más recomendable en temas de mantenimiento es el seguimiento de pautas establecidas y protocolos, junto con una comunicación efectiva con los fabricantes y/o representantes de las marcas, en busca de una retroalimentación que pueda impulsar el desarrollo y utilización de esta tecnología de manera segura.

3. Metodología

La metodología utilizada en la presente consultoría, se estructuró en base a las siguientes actividades:

- I. Mapeo de normas internacionales relacionadas con los riesgos, consecuencias y acciones a considerar en la manipulación de sistemas presurizados con hidrógeno gaseoso.
- II. Compilación de las regulaciones, políticas y procedimientos internacionales enfocados en la seguridad operacional y salud ocupacional en el uso de FCEB. Se consideró, en cuanto a las políticas, las medidas adoptadas por las autoridades como normativas obligatorias de implementar en los FCEB frente a los riesgos en su operación. Esta compilación tuvo en cuenta los siguientes aspectos: a) Etapa de operación, b) Actividad operativa, c) Protocolos, lineamientos y/o normas de seguridad, d) País o región de aplicación de los protocolos, lineamientos y/o normas de seguridad.
- III. Desarrollo de una matriz relacionada con los riesgos y las medidas de control y mitigación en caso de siniestro o vandalismo sobre los FCEB a implementar en Santiago de Chile, donde se considera: a) Riesgos durante la carga o en el terminal, b) Riesgos durante la operación, c) Medidas de control y mitigación, d) Responsables, e) Protocolos de seguridad recomendados.
- IV. Reporte con conclusiones y recomendaciones a considerar en la implementación de FCEB en Santiago de Chile.

A continuación, se detalla las actividades descritas, incluyendo en el estudio los criterios considerados para la selección de normas, protocolos, regulaciones y políticas para los sistemas presurizados con hidrógeno y las etapas de operación de los FCEB.

3.1 Criterios de selección para las normas, protocolos, regulaciones, y políticas para los sistemas presurizados con hidrógeno y las etapas de operación

La búsqueda de normas, protocolos, regulaciones, políticas y procedimientos se realizó a través de una revisión bibliográfica exhaustiva a nivel nacional e internacional. La construcción de los criterios se fundamentó en la experiencia, abarcando proyectos piloto, documentos técnicos, artículos científicos, sitios web gubernamentales, y normas automotrices.

El mercado de FCEV es liderado por Corea del Sur con un 29,4%, seguido por Estados Unidos, China, Japón y Europa, con un 27,0%, 24,6%, 12,2% y 6,8% respectivamente, según datos hasta el 2020 [52]. La investigación internacional considero a estas zonas geográficas. En el Anexo 1 se presenta el listado de la información revisada.

En el contexto nacional, la búsqueda se centró en el Ministerio de Energía (MINENERGIA), la Comisión Nacional de Energía (CNE), Agencia de Sostenibilidad Energética (AgenciaSE), Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), Asociación Chilena de Hidrógeno (H2 Chile), Instituto Nacional de Normalización (INN), el Clúster de Energía de GIZ Cono Sur (Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile – Programa 4eChile).

En el contexto internacional, la búsqueda se centró en organismos como el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés), el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), el Laboratorio del Noroeste del Pacífico (PNNL, por sus siglas en inglés), la Asociación de Gas Comprimido de Estados Unidos (CGA, por sus siglas en Inglés), programas de capacitación nacionales federales y no gubernamentales de Estados Unidos (h2tools, consejo de seguridad del hidrógeno, conferencia internacional sobre la seguridad del hidrógeno, consorcio de formación de tránsito, entre otros), la Comisión Económica para Europa (ECE), Asociación Europea de Gas Industrial (EIGA, por sus siglas en inglés), el Foro Internacional de Transporte (ITF) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA, por sus siglas en inglés), la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC, por sus siglas en inglés), la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (OSHA, por sus siglas en inglés), casos de estudio en California como en Europa por Ballard y por el Sistema de Transporte Metropolitano (MTS, por sus siglas en inglés), el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania, y la GIZ (Duetsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH).

3.2 Matriz de riesgos y medidas de control y mitigación en caso de siniestro o vandalismo

La elaboración de la matriz de riesgos se fundamentó en el trabajo realizado por Smaragdakis et. al. [34], quién utilizó la gestión del riesgo operacional (ORM, por sus siglas en inglés), ya que esta es dinámica y tiene la capacidad de ofrecer procedimientos esenciales para la gestión de riesgos en el uso cotidiano de vehículos. Además, puede llevar a cabo una evaluación detallada de los peligros asociados, principalmente debido a la escasez de datos a nivel mundial sobre incidentes operativos de FCEB. Sus etapas comprenden:

- I. Identificación de peligros y sus fuentes; buscar y registrar posibles peligros que puedan estar relacionados con la operación de FCEB.
- II. Evaluación de riesgos, qué podría suceder si alguien está expuesto a un peligro y la probabilidad de que suceda en términos de probabilidad y gravedad.

- III. Tomar decisiones de riesgo, ya sea que sea aceptable o no.
- IV. Implementación de controles, como la eliminación del riesgo mediante controles de ingeniería o administrativos.
- V. Supervisión y vigilancia de las modificaciones para garantizar la precisión de la evaluación y verificar la efectividad de los controles.

La Figura 5 ilustra los pasos de la evaluación del riesgo operativo que se ha descrito. Es relevante señalar que el trabajo expuesto se limita hasta el cuarto paso, abordando casos de siniestros o vandalismo y gestionando los riesgos durante la carga o en el terminal, así como los riesgos durante la operación en sitios abiertos y cerrados. Cuando los buses de hidrógeno se implementen en la ciudad de Santiago, será necesario considerar el quinto paso.

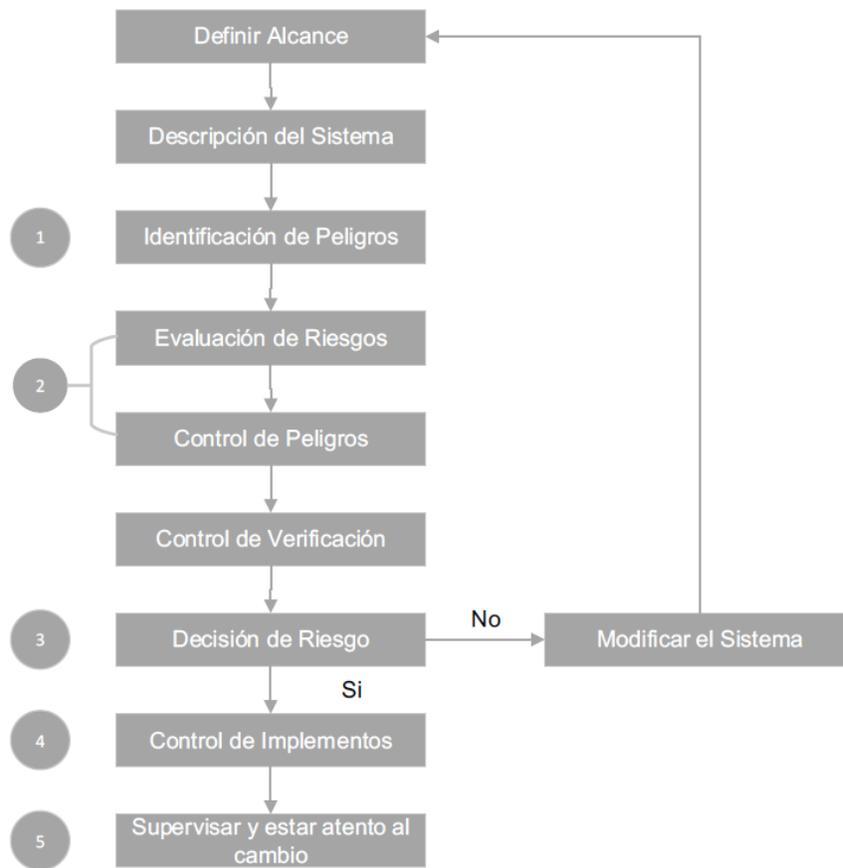


Figura 5: Pasos de la evaluación del riesgo operacional [34].

Para la elaboración de la matriz de riesgos, se hace uso del Código de Evaluación de Riesgos (RAC, por sus siglas en inglés), el cual se presenta en la Tabla 4, mientras que en la Tabla 5 se detalla cada parámetro.

Tabla 4: Matriz del Código de Evaluación de Riesgo [53].

Probabilidad	Severidad			
	D	C	B	A
I	M	H	H	H
II	T	M	H	H
III	T	M	M	H
IV	L	T	M	H
V	L	L	T	M

H: High (alto); M: Middle (medio); T: Tolerable (tolerable); L: Low (bajo)

Tabla 5: Parámetros de la matriz del código de evaluación de riesgos [54]

Relevancia(R)	Severidad del Peligro(S)		Probabilidad de Ocurrencia(F)	
H: High (Alto)	A	Catastrófico: Podría causar la muerte o la pérdida del vehículo.	I	Es probable que ocurra inmediatamente o pronto.
M: Middle (Moderado)	B	Crítico: Podría causar lesiones graves, laborales o daños al vehículo.	II	Probablemente ocurrirá con el tiempo.
T: Tolerable (Tolerable)	C	Marginal: Podría causar lesiones menores, laborales o daños a los vehículos.	III	Puede ocurrir en el tiempo.
L: Low (Bajo)	D	Insignificante: Puede que no afecte la seguridad o salud, pero es una violación de una norma de seguridad.	IV	Es poco probable que ocurra.
			V	Extremadamente improbable

Los parámetros presentados en la Tabla 5 se definen a continuación:

- Severidad del peligro (S): Grado de impacto o daño potencial que un riesgo puede provocar al sistema o a la seguridad humana, clasificándose generalmente en niveles que van de “insignificante” a “catastrófico”.
- Probabilidad de ocurrencia (F): Refiere a la frecuencia aproximada con la que se espera que se produzca un evento adverso dentro de un período de tiempo determinado, evaluándose en una escala que va de "extremadamente improbable" a "inmediatamente probable".

- Relevancia (R): Se define como la importancia de un riesgo potencial, determinada por la combinación de su severidad y la probabilidad de su ocurrencia. Esta definición se utiliza para priorizar acciones y medidas de control y mitigación. Concretamente, utilizando la Tabla 6, la relevancia se establece según la posición del riesgo dentro de la matriz. Por ejemplo, un evento con severidad “A” y probabilidad de ocurrencia “II” tendría una relevancia de “H”, ya que se ubica en la segunda fila y última columna de la matriz de riesgo.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de este estudio. La información proporcionada corresponde a las normas, protocolos, regulaciones, políticas y procedimientos revisados, los que se encuentra detallado en el Anexo I

4.1 Manipulación de Sistemas Presurizados con Hidrógeno

La Tabla 6 presenta las normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos recomendados para los sistemas presurizados con hidrógeno gaseoso, siguiendo los criterios establecidos en la metodología.

Tabla 6: Normas, protocolos o regulaciones en manipulación de sistemas presurizados con hidrógeno.

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Título	País o Región	Ref.
NFPA 2	2023	Norma	Hydrogen TechnologiesCode	EEUU	[28]
ISO TR 15916	2015	Norma	Basic considerations forthe safety of hydrogen systems	Internacional	[29]
ISO 19880-1	2020	Norma	Gaseous Hydrogen Fueling Stations Part 1:General Requirements	Internacional	[30]
ISO 19880-3	2018	Norma	Gaseous Hydrogen Fuelling stations Part 3:Valves	Internacional	[55]
ISO 19880-8	2019	Norma	Gaseous hydrogenFuelling stations Part 8: Fuel qualitycontrol	Internacional	[56]
ISO 17268	2020	Norma	Gaseous hydrogen landvehicle refuelling connection devices	Internacional	[57]
SAE J2601	2020	Protocolo	Fueling Protocols forLight Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles	Internacional	[58]
SAE J2601-2	2014	Protocolo	Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles	Internacional	[59]
SAE J2601-3	2013	Protocolo	Fueling Protocol forGaseous HydrogenPowered Industrial Trucks	Internacional	[60]
SAE J2799	2019	Norma	Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software	Internacional	[61]

Es importante señalar que en la actualidad, el INN ha incorporado la norma ISO 17268 en la norma NCh 3816.

4.2 Seguridad Operacional y Salud Ocupacional en el uso de Buses a Hidrógeno

La seguridad operacional y la salud ocupacional son aspectos fundamentales para garantizar un entorno laboral seguro y saludable. Al enfocarse en la seguridad operacional, este busca prevenir accidentes y daños durante las operaciones de una empresa o actividad. Esto implica la implementación de medidas de seguridad que protejan tanto a los empleados como a los clientes, así como al medio ambiente, abordando riesgos asociados con las operaciones. Esto incluye la consideración de factores como el diseño seguro de equipos y la gestión proactiva de riesgos.

Por otro lado, la salud ocupacional se centra en la promoción y mantenimiento de la salud física y mental de los trabajadores en su entorno laboral. Este enfoque abarca la prevención de enfermedades ocupacionales, la gestión del estrés laboral, la ergonomía y la calidad del ambiente de trabajo. Garantizar condiciones de trabajo seguras y saludables no solo beneficia a los empleados, sino que también contribuye a la productividad y al bienestar general de la organización.

La información proporcionada a continuación ofrece una visión detallada de las normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos recomendados para cada etapa de operación, conforme a los objetivos y alcances del trabajo y los criterios aplicados mediante la metodología establecida.

4.2.1 Transporte del hidrógeno

La Tabla 7 presenta el listado de normas, protocolos y regulaciones recomendadas por el equipo consultor para su consideración en Chile en la etapa operacional del transporte del hidrógeno.

Tabla 7: Normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos enfocados a seguridad operacional y/o salud ocupacional para el transporte del hidrógeno.

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
ISO 16111	2018	Norma	Seguridad Operacional	Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride	Internacional	[62]
EN 17339	2020	Norma	Seguridad Operacional	Transportable gas cylinders – Fully wrapped carbon composite cylinders and tubes for hydrogen	Unión Europea	[63]

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
EIGA 121/14	2014	Norma	Seguridad Operacional	HydrogenPipeline Systems	Unión Europea	[64]
PHMSA 49 CFR 171	2024	Regulación	Seguridad Operacional	General information, regulations, and definitions.	EEUU	[65]
PHMSA 49 CFR 172	2024	Regulación	Seguridad Operacional	Hazardous materials table, special provisions, hazardous materials communications, emergency response information, training requirements and security plans.	EEUU	[66]
PHMSA 49 CFR 173	2024	Regulación	Seguridad Operacional y Salud Ocupacional	Shippers-General requirements for shipments and packagings	EEUU	[67]
PHMSA 49 CFR 177	2024	Regulación	Seguridad Operacional	Carriage by public highway	EEUU	[68]
PHMSA 49 CFR 178	2024	Regulación	Seguridad Operacional	Specifications for packagings	EEUU	[69]
PHMSA 49 CFR 192	2024	Regulación	Seguridad Operacional	Transportation of natural and other gas by pipeline: minimum federal safety standards	EEUU	[70]

En la actualidad, las primeras dos normas mencionadas en la Tabla 7 se encuentran en proceso de estudio de homologación por parte del INN a través de las normas nacionales NCh 3815 y NCh 3818. El equipo consultor sugiere utilizar las normativas y regulaciones internacionales citadas en la Tabla 9. Una vez que las normas chilenas NCh 3815 y NCh 3818 sean aceptadas, se pueden utilizar como reemplazo y/o complemento de las normativas internacionales ISO 16111 y EN 17339, respectivamente.

4.2.2 Repostaje de hidrógeno en tanques de almacenamiento estacionario y repostaje de los buses

Las normas listadas en la Tabla 8, tienen relación con materia de seguridad en las etapas de repostaje, tanto de buses de hidrógeno, como la recarga de tanques de almacenamiento estacionarios.

Tabla 8: Normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos enfocados a seguridad operacional y/o salud ocupacional para el repostaje del hidrógeno en tanques de almacenamiento estacionario y repostaje de los buses.

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
ISO 13850	2015	Norma	Seguridad Operacional	Safety of machinery - Emergency stop function - Principles for design	Internacional	[71]
ISO 17268	2020	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices	Internacional	[57]
ISO 19880-1	2020	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous Hydrogen Fueling Station – General Requirements	Internacional	[30]
ISO 19880-3	2018	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous Hydrogen Fuelling stations Part 3: Valves	Internacional	[72]
ISO 19880-8	2019	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous hydrogen Fuelling stations Part 8: Fuel quality control	Internacional	[56]
ISO 22734	2019	Norma	Seguridad Operacional	Hydrogen generators using water electrolysis	Internacional	[73]
IEC 60204-1	2016	Norma	Seguridad Operacional	Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements	Internacional	[74]
EN 13445-5	2021	Norma	Seguridad Operacional	Unfired pressure vessels. Inspection and testing	Europa	[75]
SAE J2600	2015	Norma	Seguridad Operacional	Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices	Internacional	[76]
EIGA doc 15/21	2021	Código	Seguridad Operacional	Gaseous Hydrogen Installations	Europa	[77]
RIC 12	2020	Norma	Seguridad Operacional	Instalaciones en ambientes explosivos	Chile	[78]

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
SAE J2601	2020	Protocolo	Seguridad Operacional	Fueling Protocols for Light Duty	Internacional	[58]
SAE J2601-2	2014	Protocolo	Seguridad Operacional	Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles	Internacional	[59]
SAE J2601-3	2013	Protocolo	Seguridad Operacional	Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks	Internacional	[60]
SAE J2799	2019	Norma	Seguridad Operacional	Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software	Internacional	[61]

La documentación listada comprende normativa internacional principalmente. A nivel nacional, el INN ha homologado la norma ISO 19880-1 (NCh 3888/1), además, ha adaptado y contextualizado las normas ISO 17268 (NCh 3816) e ISO 19880-8 (NCh 3888/8).

4.2.3 Operación de los buses

A continuación, se muestra la Tabla 9 las normas, protocolos y regulaciones sugeridas en este estudio. Estas se proponen para su análisis y aplicación en Chile durante la etapa operativa de los FCEB.

Tabla 9: Normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos enfocados a seguridad operacional y/o salud ocupacional para la operación de los buses.

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
ISO 23273	2013	Norma	Seguridad Operacional	Fuel cell road vehicles —Safety specifications —Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen	Internacional	[79]
ISO 21266	2018	Norma	Seguridad Operacional	Road vehicles. Compressed gaseous hydrogen (CGH ₂) and hydrogen/natural gas blends fuel systems.	Internacional	[80] [81]

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
ISO 19882	2018	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous hydrogen - Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers	Internacional	[82]
ISO 12619	2014	Norma	Seguridad Operacional	Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blend fuel system components	Internacional	[83] [84]
ISO 19881	2018	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous hydrogen Land vehicle fuel containers	Internacional	[85]
IEC 62282-2-100	2020	Norma	Seguridad Operacional	Fuel cell technologies	Unión Europea	[86]
UN Regulation 134	2015	International	Seguridad Operacional	Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV)	Unión Europea	[87]
Technical Standard – Attachment 101	2020	Regulación	Seguridad Operacional	Technical standard for protection of occupants against high voltage in fuel cell vehicles	Japón	[88]
Motor Vehicle Safety Standards 301	2021	Regulación	Seguridad Operacional	Motor Vehicle Safety	EEUU	[89]
Motor Vehicle Safety Standards 304	2022	Regulación	Seguridad Operacional	Compressed natural gas fuel container integrity.	EEUU	[90]

Las primeras cinco normas señaladas en la Tabla 9 ya han sido incorporadas en Chile, identificadas como NCh 3822 (ISO 23273), NCh 3824 (ISO 21266), NCh 3823 (ISO19882), NCh 3825 (ISO12619), NCh 3826 (ISO 19881), NCh 3817 (ISO 19882), respectivamente.

4.2.4 Mantenimiento de los equipos de generación, almacenamiento y repostaje

Las normativas listadas en la Tabla 10, se enfocan en la seguridad dentro del contexto de mantenimiento de equipos asociados a las etapas de operación. Dentro de las labores de mantenimiento de equipos de generación, almacenamiento y repostaje, se debe considerar los requerimientos para generar un entorno de trabajo seguro.

Tabla 10: Normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos enfocados a seguridad operacional y/o salud ocupacional para el mantenimiento de los equipos de generación, almacenamiento y repostaje.

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
NFPA 2	2023	Norma	Seguridad Operacional	Hydrogen Technologies Code	EEUU	[28]
ISO 19880-1	2020	Norma	Seguridad Operacional	Gaseous Hydrogen Fueling Station-General Requirements	Internacional	[30]
IEC 60079-10-1	2022	Norma	Seguridad Operacional	Classification of areas - Explosive gas atmospheres	Internacional	[91]
EIGA 211/17	2017	Norma	Seguridad Operacional	Hydrogen Vent Systems for Customer Applications	Internacional	[92]
EN 60079-14	2016	Norma	Seguridad Operacional	Explosive atmospheres Part 14: Electrical Installations Design, selection and erection	Europa	[93]
OSHA 29 CFR 1910.103	2023	Regulación	Salud Ocupacional	Occupational Safety and Health Administration-Subpart H – Hazardous Materials – Hydrogen	EEUU	[94]
RIC 12	2020	Norma	Seguridad Operacional	Instalaciones en ambientes explosivos	Chile	[78]
EIGA Doc 134/21	2021	Norma	Seguridad Operacional	Potentially Explosive Atmospheres EU Directive 1999/92/EC	Unión Europea	[95]
EIGA Doc 15/21	2021	Código	Seguridad Operacional	Gaseous Hydrogen Installations	Europa	[96]

De la Tabla 10, se destacan el código NFPA 2, capítulo 7 de hidrógeno gaseoso; y la normativa EN 60079 asociada a instalaciones eléctricas y clasificación de zonas peligrosas en ambientes con potenciales atmósferas explosivas, contenidas y adoptadas en el pliego técnico RIC 12 también mencionado.

4.2.5 Mantenimiento de los Buses

Para el mantenimiento de buses, las normativas listadas buscan generar las recomendaciones o requisitos en materia de seguridad en torno a las labores de mantenimiento de buses, y principalmente a los talleres y recintos donde se lleven a cabo actividades de mantenimiento, teniendo en cuenta que, en su mayoría, las actividades y protocolos son entregadas por el fabricante y/o representante de la marca de cada vehículo. Las normas listadas se enfocan en gran medida en la prevención y en el entorno de trabajo seguro más que en el trabajo de mantenimiento en sí.

Tabla 11: Normas, protocolos, regulaciones, políticas o procedimientos enfocados a seguridad operacional y/o salud ocupacional para el mantenimiento de los buses.

Nombre/Código	Última Actualización	Categoría	Sistema de Gestión	Título	País o Región	Ref.
NFPA 2 Capítulo 18	2023	Norma	Seguridad Operacional	Hydrogen Technologies Code Chapter 18: Repair Garage	EEUU	[28]
IEC 60079-10-1	2022	Norma	Seguridad Operacional	Classification of areas – Explosive gas atmospheres	Internacional	[91]
EN 60079-14	2016	Norma	Seguridad Operacional	Explosive atmospheres Part 14: Electrical Installations Design, selection and erection	Europa	[93]
RIC-12	2020	Norma	Seguridad Operacional	Instalaciones en ambientes explosivos	Chile	[78]
EIGA 211/17	2017	Norma	Seguridad Operacional	Hydrogen Vent Systems for Customer Applications	Europea	[92]

Destaca la relevancia del código NFPA 2, capítulo 18 de Talleres de reparación, junto con las secciones de la norma EN 60079 vinculadas a instalaciones eléctricas y la clasificación de zonas peligrosas en entornos con posibles atmosferas explosivas. Estos elementos se encuentran detallados y adoptados en el pliego técnico RIC 12, también referido anteriormente. Es importante señalar que, en la actualidad, en el INN se encuentra en curso un proceso de consulta pública para un conjunto de normas relacionadas con el hidrógeno [97].

4.2.6 Información Transversal a las Etapas de Operación

En la revisión de la normativa relacionada con la seguridad operacional y ocupacional en el ámbito del hidrógeno, se han identificado documentos que ofrecen información significativa y aplicable a todas las etapas de operación, a saber:

- I. NFPA 2 [28]: es un código relevante que constituye un marco integral por medio del cual se establece directrices exhaustivas para la seguridad relacionada con el hidrógeno, tanto de manera general como particularmente para el caso de hidrógeno gaseoso e hidrógeno líquido, en todas las etapas de su cadena de valor, dentro de las cuales se abordan aspectos críticos en producción, almacenamiento, transporte, procesamiento y uso, garantizando prácticas seguras y protocolos de emergencia efectivos. Su adopción no solo proporciona un marco sólido para la seguridad industrial, sino que también facilita la coherencia y el cumplimiento normativo a nivel global, promoviendo estándares uniformes para la prevención de accidentes y la protección de vidas y

propiedades. Aunque su contenido parece limitado en detalle, da una visión general sobre el hidrógeno, abordando aspectos relacionados con su seguridad en aplicaciones móviles y estacionarias. Es esencial destacar que este código es específico de los Estados Unidos y no tiene un alcance internacional; sin embargo, se cita ampliamente entre los fabricantes de componentes para vehículos a hidrógeno en todo el mundo. En cuanto a contenido, y como se mencionó anteriormente, aborda requisitos para producción segura de hidrógeno, en donde incluye selección adecuada de equipos y procedimientos que minimicen los riesgos de seguridad. Se centra también en establecer pautas para el almacenamiento seguro del hidrógeno, en donde cubre aspectos como la capacidad y materialidad de contenedores, la ventilación adecuada para recintos en los que se manipule hidrógeno y sistemas de detección de fugas que puedan ocurrir. Aborda además la distribución segura del hidrógeno, considerando la integridad de las tuberías, prácticas de carga y descarga, y capacitación del personal. También se incluyen disposiciones detalladas para usar el hidrógeno en varias aplicaciones, desde la industria química hasta el transporte y generación de energía, implicando medidas de instalación de sistemas de detección de gas, formación de emergencia y diseño de instalaciones que minimicen los riesgos para trabajadores y público. El contenido anteriormente mencionado se va distribuyendo mediante capítulos a lo largo del código, desde requerimientos generales como lo son el diseño, instalación y manejo seguro de sistemas de hidrógeno (ya sea líquido o gaseoso) asociados a las etapas de cadena de valor mencionadas, hasta capítulos que se enfocan en aplicaciones particulares, y que se complementan con los requerimientos de corte general, como por ejemplo, hidrógeno para combustión, operaciones en laboratorios, garajes de estacionamiento y talleres de reparación de FCEV.

- II. ISO 15916 [29]: se selecciona por su amplitud en la aplicación a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno. El estándar proporciona una estructura exhaustiva y sistemática para comprender las propiedades del hidrógeno, los riesgos asociados con su uso y las medidas de seguridad y mitigación correspondientes. Destaca la necesidad de evaluar y abordar los riesgos, desde la producción hasta la operación y mantenimiento de instalaciones de hidrógeno. La inclusión de recomendaciones específicas para la minimización de riesgos, detección de fugas, prevención de incendios y explosiones, así como la promoción de una cultura de seguridad, demuestra la amplitud y la profundidad de la cobertura de este estándar. Además, la mención de lecciones aprendidas de experiencias pasadas y la preferencia por eliminar peligros cuando sea posible refuerzan la importancia de adoptar prácticas seguras en todas las fases de la cadena de valor del hidrógeno. Es un estándar internacional con consideraciones básicas de seguridad.
- III. ISO 19880-1 [30]: se elige por su contenido de los requisitos mínimos para el diseño, instalación, puesta en marcha, operación, inspección y mantenimiento de estaciones de

suministro de hidrógeno. Es relevante destacar que, aunque el documento se enfoca en la recarga de vehículos livianos de hidrógeno, también aborda requisitos y orientaciones para estaciones de combustible destinadas a vehículos medianos y pesados, como buses y camiones. Cabe señalar que, aunque el estándar proporciona requisitos y orientaciones generales para varios elementos de una estación de combustible, reconoce la necesidad de requisitos específicos adicionales para garantizar la operación segura de estaciones de combustible en casos particulares.

- IV. ISO 14687:2019 [98]: se elige esta norma por proporcionar un marco integral y robusto para el control de calidad del hidrógeno. Su amplio enfoque, que incluye aspectos cruciales como clasificación, contaminantes, métodos analíticos y muestreo, la convierte en una elección indispensable para asegurar la calidad y seguridad en diversas aplicaciones del hidrógeno combustible. Destaca su tratamiento exhaustivo de las especies contaminantes, especialmente aquellas que afectan las PEM-FC, delineando sus efectos y estableciendo límites de concentración de dichas sustancias como, por ejemplo, el oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y agua. En este contexto, se destaca la importancia de que el proveedor de hidrógeno y el consumidor participen en la definición de estándares de calidad, consolidando así una colaboración clave para el cumplimiento de los requisitos específicos de cada aplicación para, de esta manera, asegurar el rendimiento óptimo de los sistemas de energía que en base a hidrógeno como combustible y también evitando posibles daños en equipos asociados a las diferentes etapas dentro de la cadena de valor.
- V. ASME B31.12 [99]: el transporte del hidrógeno, un vector de energía limpio y versátil demanda una infraestructura robusta que asegure su distribución de manera segura y eficiente. En este contexto, las normas juegan un papel esencial, y entre ellas destaca el código ASME B31.12, el cual establece pautas fundamentales para el diseño de gasoductos o tuberías lineales de hidrógeno, comúnmente conocidas como "pipelines". Este código presenta dos enfoques principales: el Método Prescriptivo y el Método Basado en el Desempeño. Cada uno de estos métodos aborda el diseño de las tuberías desde perspectivas distintas, pero ambos comparten un objetivo común: garantizar la seguridad, centrándose especialmente en mitigar el riesgo de fragilización derivado de la interacción del hidrógeno con el metal de la tubería.
- VI. ISO 26142 [100]: esta normativa funciona como un complemento de enfoque en materia de seguridad de acuerdo con los requerimientos de sistemas de hidrógeno, dentro de los cuales destaca la detección oportuna de este gas mediante equipos y aparatos que estén debidamente diseñados y testeados para dicha aplicación, proveyendo herramientas para elección ideal de dichos aparatos para la detección de fugas de hidrógeno en virtud de su enfoque específico y detallado. Al definir los requisitos de rendimiento y métodos de prueba para el aparato de detección de hidrógeno en

aplicaciones estacionarias, proporciona un marco sólido para garantizar la medición precisa y la supervisión efectiva de las concentraciones de hidrógeno. Su alcance abarca las operaciones de seguridad a nivel único y/o multinivel, lo que significa que se adapta a diversas operaciones de seguridad, como purga de nitrógeno, ventilación y/o cierre del sistema, según la concentración de hidrógeno presente.

El equipo consultor recomienda priorizar la revisión de normativas transversales descritas anteriormente.

4.3 Resumen de Normas, Regulaciones, Políticas, Protocolos y Procedimientos

La Figura 6 presenta la cadena de valor del hidrógeno que considera: generación de hidrógeno, transporte, almacenamiento, dispensado (repostaje), y uso final que se divide en operación de buses y en mantenimiento de equipos y buses. En el recuadro inferior se destacan aquellas normas aplicables en toda la cadena de valor. Por otro lado, la Figura 7 muestra las etapas de operación que corresponden a: transporte del hidrógeno; repostaje del hidrógeno en tanques de almacenamiento; repostaje de los buses; operación de buses; y mantenimiento tanto de equipos (generación, almacenamiento y repostaje) y de buses. En resumen, la Figura 6 y Figura 7 permiten abordar dos perspectivas diferentes sobre un mismo problema.



TRANSPORTE	REPOSTAJE TANQUES ALMACENAMIENTO	REPOSTAJE DE BUSES	OPERACIÓN DE BUSES	MANTENIMIENTO	
				EQUIPOS	BUSES
<ul style="list-style-type: none"> • ISO 16111 • EN 17339 • EIGA 121/14 • PHMSA 49 CFR 171 • PHMSA 49 CFR 172 • PHMSA 49 CFR 173 • PHMSA 49 CFR 177 • PHMSA 49 CFR 178 • PHMSA 49 CFR 192 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 13850: 2015 • EIGA DOC 15/21 • EN 13455-5 • IEC 60204-1: 2016 • ISO 22734 • RIC 12 • ISO 19880-3 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 19880-8 • ISO 17268 • RIC 12 • ISO 19880-3 • SAE J2600 • SAE J2601 • SAE J2601-2 • SAE J2601-3 • SAE J2799 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 23273 • ISO 21266 • ISO 19882 • ISO 12619 • ISO 19881 • IEC 62282 • SAE J2578 • SAE J2579 • SAE J2990/1 • UN REGULATION 134 TECHNICAL STANDAR- ATT 101 • MOTOR VEHICLE SAFETY ASTANDARDS 301 • MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARDS 304 	<ul style="list-style-type: none"> • NFPA2-CAP 7 • ISO 19880-1 • OSHA 29 CFR 1910.103 • IEC 60079-10-1 • EN 60079-14 • EIGA 211/17 • RIC-12 	<ul style="list-style-type: none"> • NFPA2-CAP 18 • IEC 60079-10-1 • EN 60079-14 • EIGA 211/17 • RIC-12
<ul style="list-style-type: none"> • NFPA2 • ISO TR 15916 • ASME B31.12 • ISO 14687:2019 • ISO 26142 • ISO 19880-1 					

Figura 6: Resumen de normativa asociada a seguridad de acuerdo con las etapas de operación.

GENERACIÓN	TRANSPORTE	ALMACENAMIENTO	DISPENSADO	USO FINAL	
				BUSES	MANTENIMIENTO
<ul style="list-style-type: none"> • ISO 22734 • IEC 60079-10-1 • RIC 12 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 16111:2018 • EN 17339 • EIGA 121/14 • PHMSA 49 CFR 171 • PHMSA 49 CFR 172 • PHMSA 49 CFR 173 • PHMSA 49 CFR 177 • PHMSA 49 CFR 178 • PHMSA 49 CFR 192 	<ul style="list-style-type: none"> • EN 13445-5 • IEC 60079-10-1 • RIC 12 • EIGA DOC 15/21 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 13850:2015 • ISO 19880-8 • SAE J2600 • IEC 60079-10-1 • ISO 19880-3 • SAE J2600 • SAE J2601 • SAE J2601-2 • SAE J2601-3 • SAE J2799 	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 17268 • ISO 23273 • ISO 21266 • ISO 12619 • ISO 19881 • IEC 62282 • SAE J2578 • SAE J2579 • SAE J2990/1 • UN REGULATION 134 • TECHNICAL STANDAR- ATT 101 • MOTOR VEHICLE SAFETY ASTANDARDS 301 • MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARDS 304 	<ul style="list-style-type: none"> • NFPA2- CAP 7 • NFPA2- CAP 18 • EN 60079-10-1 • EN 60079-14 • RIC 12 • OSHA 29 CFR 1910.103 • EIGA DOC 211/17
<ul style="list-style-type: none"> • NFPA 2 • ISO TR 15916 • ASME B31.12 • ISO 14687:2019 • ISO 26142 • ISO 19880-1 					

Figura 7: Resumen de normativa según cadena de valor de hidrógeno.

Finalmente, es importante por mencionar que, el INN desempeña un papel esencial en la formulación de normativas en Chile, llevando a cabo un proceso de consenso que involucra a diversas partes interesadas. Estas normativas, inicialmente de carácter voluntario, pueden adquirir obligatoriedad al ser incorporadas en un reglamento oficial. En este sentido, las normativas internacionales, como las del comité técnico ISO/TC 197 "Hydrogen Technologies" [101], son fundamentales. En el contexto chileno, las normativas relacionadas con el hidrógeno se basan en adaptaciones y/o homologaciones de estándares relevantes de este comité, destacando la importancia de la estandarización en toda la cadena de valor del hidrógeno. Además, los resultados de este estudio fueron cotejados con la información proporcionada por el INN durante el seminario "Calidad, Seguridad y Reglamentación en la Industria en Chile" [102] y por la información disponible en la página web del INN. En este seminario se enfatizó la relevancia de la reglamentación en el desarrollo de la industria del hidrógeno, subrayando la necesidad de normativas adecuadas para orientar el desempeño óptimo en contextos específicos. Actualmente, el INN ha elaborado 26 normas relacionadas con la industria del hidrógeno como se aprecia en la Tabla 12, de las cuales 14 están publicadas y otras 12 se encuentran en proceso de consulta pública, lo que refleja el constante esfuerzo por actualizar y mejorar el marco normativo para impulsar el avance de esta industria en Chile.

Tabla 12: Normas relacionadas con la industria del hidrógeno en el INN.

N°	Normas chilenas	Normas Intl.	Título	Estado	Aplica FCEV
1	NCh3888/1:2024	ISO 19880-1:202	Hidrógeno gaseoso - Estaciones de servicio - Parte 1: Requisitos generales	Publicado	Si
2	NCh3888/8:2024		Hidrógeno gaseoso - Estaciones de servicio - Parte 8: Control de calidad del combustible	Publicado	Si
3	NCh3817:2024	ISO 19881:2018	Hidrógeno gaseoso - Contenedores de combustible para vehículos terrestres	Publicado	Si
4	NCh3746:2022		Generadores de hidrógeno que utilizan electrólisis de agua - Aplicaciones industriales, comerciales y residenciales	Publicado	No
5	NCh3814/1:2023		Generadores de hidrógeno que utilizan tecnologías de procesamiento de combustible - Parte 1: Seguridad	Publicado	No
6	NCh3814/2:2023		Generadores de hidrógeno que utilizan tecnologías de procesamiento de combustible - Parte 2: Métodos de ensayo para el rendimiento	Publicado	No
7	NCh3816:2023	ISO 17268	Dispositivos de conexión de reabastecimiento de vehículos terrestres de hidrógeno gaseoso	Publicado	Si
8	NCh3822:2023	ISO 23273	Vehículos de carretera con pila de combustible - Especificaciones de seguridad - Protección contra los peligros del hidrógeno para vehículos alimentados con hidrógeno comprimido	Publicado	Si
9	NCh3823:2023	ISO 19882	Hidrógeno gaseoso - Dispositivos de descarga de presión activados térmicamente para contenedores de combustible de hidrógeno comprimido para vehículos	Publicado	Si
10	NCh3824/1:2023	ISO 21266-1	Vehículos de carretera - Sistemas de combustible de hidrógeno gaseoso comprimido (CGH2) y mezclas de hidrógeno y gas natural - Parte 1: Requisitos de seguridad	Publicado	Si
11	NCh3824/2:2023	ISO 21266-2	Vehículos de carretera - Sistemas de combustible de hidrógeno gaseoso comprimido (CGH2) y mezclas de hidrógeno y gas natural - Parte 2: Métodos de ensayo	Publicado	Si
12	NCh3825/1:2023	ISO 12619-1	Vehículos de carretera - Componentes del sistema de combustible de hidrógeno gaseoso comprimido (CGH2) y mezclas de hidrógeno y gas natural - Parte 1: Requisitos generales y definiciones	Publicado	Si
13	NCh3825/2:2023	ISO 12619-2	Vehículos de carretera - Componentes del sistema de combustible de hidrógeno gaseoso comprimido (CGH2) y mezclas de hidrógeno y gas natural - Parte 2: Rendimiento y métodos de prueba generales	Publicado	Si
14	NCh3826:2023	ISO 23828	Vehículos de carretera con celdas de combustible - Medición del consumo de energía - Vehículos alimentados con hidrógeno comprimido	Publicado	Si
15	prNCh388 7		Infraestructura del gas - Calidad del Gas - Grupo H	Consulta Publica Finalizada	Si
16	prNCh388 4		Evaluación de la resistencia de los productos de acero a la fisuración inducida por hidrógeno (HIC)	Consulta Publica Finalizada	Si

N°	Normas chilenas	Normas Intl.	Titulo	Estado	Aplica FCEV
17	prNCh388 5		Método de medición de la permeación de hidrógeno y determinación de la absorción y transporte de hidrógeno en metales mediante una técnica electroquímica	Consulta Publica Finalizada	Si
18	prNCh388 6-11		Corrosión de metales y aleaciones: Fisuración por corrosión bajo tensión - Parte 11: Directrices para probar la resistencia de metales y aleaciones a la fragilización y fisuración asistida por hidrógeno.	Consulta Publica Finalizada	Si
19	prNCh388 3		Hidrógeno Gaseoso.	En Consulta Publica	Si
20	IN N IT 22		Datos que respaldan el desarrollo de estándares para tanques compuestos para aplicaciones de infraestructura del Hidrógeno	En Consulta Publica	Si
21	prNCh381 3		Calidad del hidrógeno combustible - Especificaciones.	En calendario	Si
22	prNCh381 9		Hidrógeno en estado gaseoso - Cilindros y tubos para almacenamiento estacionario.	En calendario	Si
23	prNCh381 5		Dispositivos de almacenamiento de gas transportable – Hidrógeno absorbido en hidruro metálico reversible	En calendario	Si
24	PrINCh/IT 3		Consideraciones básicas para la seguridad de los sistemas de hidrógeno	En calendario	Si
25	prNCh381 8		Cilindros de gas transportables- Cilindros y tubos de compuesto de (carbono totalmente envuelto para hidrógeno	En calendario	Si
26	prNCh382 1		Hidrógeno líquido: Interfaz del sistema de abastecimiento de combustible para vehículos terrestres	En calendario	Si

4.4 Matriz de riesgos y medidas de control y mitigación

La Tabla 13 muestra los riesgos identificados en caso de vandalismo o siniestro. Cada uno de estos se clasifica según las etapas planteadas: operación (sitios abiertos y cerrados) y repostaje o terminal. Además, se le asignó una severidad (S) y una probabilidad de ocurrencia (F) de acuerdo con la información presente en la literatura [53], [54] junto con la información entregada por parte del DTPM.

Tabla 13: Riesgos en caso de siniestros o vandalismo sobre los buses en Santiago de Chile.

N° ID	Riesgo	Operación	Repostaje o Terminal	S	F	R
(1)	Shock eléctrico ² por alta tensión	✓	✓	A	III	H
(2)	Accidente automovilístico	✓		A	II	H
(3)	Sobrecalentamiento	✓	✓	B	III	M
(4)	Fuego/Explosión	✓	✓	A	II	H

² Según norma IEC 60.479-1, el concepto se define como una reacción fisiológica o lesión causada por la corriente eléctrica que pasa a través del cuerpo humano. Para alta tensión, las consecuencias son contracción muscular involuntaria, marcas de quemaduras en la piel, daño a los tejidos internos, y en casos extremos, paro cardíaco o la muerte

N° ID	Riesgo	Operación	Repostajeo Terminal	S	F	R
(5)	Corto circuito de alta tensión	✓		B	III	M
(6)	Golpes con objeto contundente atankes de hidrógeno	✓		A	II	H
(7)	Robo de componentes o del vehículo	✓	✓	B	III	M
(8)	Daños a tren de potencia del vehículo	✓	✓	B	II	H
(9)	Daños a carrocería del vehículo	✓	✓	C	II	M
(10)	Fugas de hidrógeno	✓	✓	A	II	H
(11)	Disminución del rendimiento de las celdas de combustible por contaminación o impurezas ³ en el hidrógeno		✓	C	II	M
(12)	Fuga de líquidos refrigerantes o lubricantes	✓	✓	C	II	M
(13)	Fallo en el sistema de frenos	✓		B	III	M
(14)	Interferencias en la comunicación inalámbrica del vehículo	✓		C	III	M
(15)	Daños a los sensores del vehículo	✓	✓	C	IV	T
(16)	Grafitis o daños estéticos intencionales ⁴		✓	D	II	T
(17)	Golpes con objeto contundente a línea de hidrógeno	✓	✓	A	II	H
(18)	Obstrucción sistemas de ventilación	✓	✓	B	II	H
(19)	Daños a la batería	✓	✓	A	II	H
(20)	Descompresión línea de hidrógeno	✓	✓	A	II	H
(21)	Pérdidas de aislamiento	✓	✓	B	II	H
(22)	Asfixia por hidrógeno	✓	✓	A	III	H

Utilizando la Tabla 13, se construye la matriz de riesgo de la Tabla 14.

Tabla 14: Matriz de riesgo asociada a vandalismo o siniestro.

Probabilidad	Severidad			
	D	C	B	A
I				
II	(16)	(9)(11)(12)	(8)(18)(21)	(2)(4)(6)(10)(11) (17)(19)(20)
III		(14)	(3)(5)(7)(13)	(1)(22)
IV		(15)		
V				

En la Tabla 15 se ilustran los riesgos distribuidos en tres categorías: riesgos asociados al manejo de hidrógeno a altas presiones, utilización de alta tensión y vandalismo. Estas dos primeras se eligen

³ Dicha contaminación o impurezas puede ser atribuida a la manipulación en las estaciones de carga y/o suciedad en las unidades de almacenamiento o distribución.

⁴ Se considera como un riesgo potencial dado que el rayado podría cubrir información relevante del bus de transporte público, lo cual obligaría a la entidad encargada a retirarlo de circulación para su posterior limpieza.

debido a que son las categorías más generales en FCEB, mientras que la tercera se selecciona por el riesgo de circular en zonas conflictivas. La Tabla 16 se construye a partir de los riesgos más relevantes identificados en la matriz de riesgos anterior. Además del vandalismo o siniestros, los riesgos pueden tener otras fuentes igualmente relevantes al implementar la tecnología. Es importante identificar el origen o fuente del riesgo, además, de su magnitud, lo que influye directamente en cómo se perciben y gestionan los riesgos Gardoni y Murphy [103]. Esta identificación de fuentes es crucial porque permite una comprensión más profunda de las causas fundamentales de los riesgos y facilita la implementación de estrategias de control y mitigación más específicas y efectivas. Por ejemplo, el riesgo "Fuego/explosión (4)", que tiene como fuente el "Sobrecalentamiento (3)", también listado en la matriz. Este ejemplo muestra cómo un riesgo puede ser la fuente de otro, enlazando directamente la interconexión de riesgos discutida en los estudios de Gardoni y Murphy [103]. Además, el sobrecalentamiento puede ser causado por un cortocircuito o una fuga de hidrógeno, riesgos que también se encuentran dentro de la matriz con el N° ID (5) y (10) respectivamente. Lo anterior permite observar que los riesgos planteados en la matriz están interconectados, ya que estos pueden actuar como fuentes de otros. Con esto en mente, se pueden elaborar medidas de control y mitigación que aborden un conjunto de riesgos. Finalmente, la fuente "Vandalismo" presenta un amplio rango de riesgos potenciales, como se muestra en la Tabla 15, por lo que las medidas de control y mitigación presentadas en la Tabla 16 están diseñadas para abarcar todos aquellos relacionados con dicha fuente para cada caso.

Tabla 15: Distribución de riesgos.

Categoría	N° ID
Hidrógeno a alta presión	(3)(4)(10)(11)(20)(22)
Alta tensión	(1)(3)(5)(21)
Vandalismo (Quema intencional, Golpe con objeto contundente, entre otros)	(2)(3)(4)(6)(7)(8)(9)(10)(12)(13)(14)(15)(16)(17)(18)(19)(20)

Tabla 16: Recomendaciones relacionadas con la seguridad operacional de los FCEB frente a los riesgos.

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Fuego/ Explosión [N° ID: (4)]	Batería	1) Monitoreo constante para detectar signos de sobrecalentamiento, sobrecarga o deterioro. 2) Funciones de apagado automático paradesconectar la batería encaso de detectar condiciones peligrosas. Además, el	IEC 62619 Technical Standard – Attachment 101 NFPA 2	1) Los responsables son típicamente los operadores de flota a través de su equipo de mantenimiento, ya que se encuentra dentro de su obligación contractual. Este equipo debe implementar un plan que incluya la selección e instalación de los sensores adecuados en puntos críticos, configurar un sistema de monitoreo centralizado para la recolección y análisis de datos en tiempo real, y establecer

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Fuego/ Explosión [N° ID: (4)]		vehículo debe contar con extintores en base a dióxido de carbono.		<p>protocolos de respuesta rápida ante cualquier anomalía detectada. Además, deben realizar entrenamientos periódicos con todo el personal involucrado para asegurar una respuesta eficaz en caso de emergencia.</p> <p>2) El fabricante debe integrar en el sistema de gestión de baterías, circuitos de protección y un software que monitoree constantemente parámetros críticos, detectando anomalías que puedan indicar condiciones peligrosas. Debe programarse para realizar un apagado automático seguro de la batería cuando se detecten estas condiciones, evitando daños mayores al sistema y garantizando la seguridad. Por otro lado, el equipo de mantenimiento (perteneciente a los operadores de flota) es responsable de realizar inspecciones regulares para asegurar el correcto funcionamiento del sistema y de los circuitos de protección, así como de actualizar el software según sea necesario para mejorar la eficacia de la detección de condiciones peligrosas y la respuesta de apagado. Los operadores o concesionarios de la flota deben hacerse responsables de la continua revisión del estado de los extintores junto con su reposición dado que estos cuentan con fecha de caducidad.</p>
	Sobrecalentamiento ⁵ [N° ID: (3)]	<p>1) Comprobar que la celda de combustible cuenta con un sistema de protecciones contracortocircuito o fuga en el stack.</p> <p>2) Comprobar que el vehículo cuenta con un sistema de ventilación diseñado para combatir fugas del gas. Este sistema debe estar conectado a sensores de hidrógeno que activen la ventilación de manera automática. Procurar que la ventilación no sea fácil de obstruir ya sea accidental o intencionalmente, para ello contar con barreras físicas que protejan el sistema.</p>	<p>SO 16110</p> <p>CGA-G-5.5</p> <p>ISO 26142</p> <p>IEC 60079</p>	<p>1) El Fabricante debe asegurar que la pila cuenta con un sistema de protecciones avanzado, capaz de detectar y responder a cortocircuitos o fugas en el stack. Este sistema debe estar equipado con sensores de alta precisión que monitoricen continuamente el estado de la pila y activen medidas correctivas inmediatas ante cualquier anomalía detectada. Adicionalmente, los sistemas de control deben ser programados para ajustar automáticamente las operaciones del stack y mantenerlas dentro de parámetros seguros, evitando así riesgos potenciales como incendios o daños al sistema. Esto incluye el desarrollo de algoritmos de control que puedan adaptarse dinámicamente a variaciones en las condiciones operativas. Los equipos de mantenimiento de los operadores de flota deben llevar a cabo inspecciones regulares y actualizaciones necesarias para asegurar un rendimiento óptimo y seguro a largo plazo, y los operadores deben estar adecuadamente capacitados para entender y reaccionar ante las alertas del sistema.</p> <p>2) fabricante debe incorporar un sistema de ventilación eficaz que pueda detectar</p>

⁵ Como se mencionó con anterioridad, el sobrecalentamiento puede ser producido por un corto circuito de alta tensión [N° ID: (5)] y/o fuga de hidrógeno [N° ID: (10)].

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Fuego/ Explosión [N° ID: (4)]				concentraciones peligrosas de hidrógeno y responder de manera inmediata para disipar cualquier acumulación de gas. Los sensores de hidrógeno deben estar estratégicamente ubicados para monitorear las concentraciones de hidrógeno en tiempo real y estar integrados con el sistema de control de ventilación para activar automáticamente el flujo de aire fresco cuando sea necesario. El fabricante debe asegurarse de que las barreras físicas y protección contra obstrucciones se integre de tal manera que no obstaculice al funcionamiento y/o mantenimiento del bus. Finalmente, el equipo de mantenimiento debe garantizar la operatividad del sistema, mientras que el personal de operaciones es formado en prácticas seguras y respuesta a emergencias.
	Vandalismo	<p>1) Reforzar las áreas vulnerables del autobús, como los compartimentos de hidrógeno y baterías.</p> <p>2) Establecer y practicar procedimientos claros para responder rápidamente en caso de incendio o explosión, incluyendo la evacuación segura de pasajeros y la notificación a los servicios de emergencia. Además, se recomienda utilizar extintores de polvo químico seco (especialmente aquellos clasificados para fuegos de clase B y C) o extintores de dióxido de carbono como medida de contención primaria.</p>	NFPA 2 Motor Vehicle Safety Standards 304	<p>1) El fabricante debe evaluar los riesgos potenciales, seleccionando materiales resistentes al impacto, aplicando tecnologías de mitigación de riesgos. Además, es fundamental integrar sistemas de detección y supresión de incendios específicos para hidrógeno, siguiendo normativas internacionales de seguridad. La implementación efectiva requiere pruebas rigurosas, incluyendo simulaciones de impacto y escenarios de accidentes, para validar la efectividad de los refuerzos y ajustar el diseño según sea necesario, dichas pruebas idealmente deberían ser realizadas por algún organismo de certificación vehicular como 3CV.</p> <p>2) Se requiere una colaboración estrecha entre los operadores o concesionarios de la flota, equipos de seguridad, y servicios de emergencia. Deben elaborarse manuales de procedimiento detallados que incluyan rutas de evacuación, puntos de reunión seguros, y métodos de notificación eficientes para los servicios de emergencia. Es crucial realizar entrenamientos específicos con el personal y simulacros frecuentes con pasajeros para asegurar una respuesta rápida y organizada, lo anterior debe ser llevado a cabo por los operadores o concesionarios de la flota bajo los estándares que determine el DTPM. La revisión periódica de estos procedimientos y su actualización basada en retroalimentación y nuevas prácticas de seguridad son esenciales para mantener su efectividad. Los operadores o concesionarios de la flota deben hacerse responsables de la continua revisión de estado de los extintores junto con su reposición dado que estos cuentan con fecha de caducidad.</p>

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Shock Eléctrico por alta tensión [N° ID: (1)]	Accidente automovilístico ⁶ [N° ID: (2)]	<p>1) Contar con interruptores de emergencia y puntos de desconexión de energía eléctrica claramente identificados.</p> <p>2) Proporcionar información específica a equipos de emergencia sobre los riesgos asociados con los autobuses con celdas de combustible de hidrógeno y cómo manejarlos de manera segura, incluyendo la desconexión del sistema eléctrico del vehículo</p>	<p>EN 60079-14</p> <p>Technical Standard – Attachment 101</p> <p>Motor Vehicle Safety Standards 304</p>	<p>1) La responsabilidad recae en los ingenieros de diseño y seguridad de los fabricantes de vehículos. Además, tanto el personal de emergencia (Bomberos y Carabineros) como el de operaciones debe recibir formación específica sobre la ubicación y el uso de estos dispositivos para asegurar una respuesta rápida y segura en caso de accidente.</p> <p>2) Los responsables, en primera instancia, son los fabricantes dado que estos deben entregar toda la información relacionada a la operación segura del bus principalmente a través de manuales, sumado a lo anterior, el DTPM debe masificar esta información tanto a los operadores o concesionarios de la flota como a los equipos de emergencia. Es esencial que exista un trabajo conjunto para desarrollar materiales educativos detallados y accesibles, además de organizar sesiones de capacitación específicas para equipos de emergencia y actualizar regularmente estas guías en función de los avances tecnológicos y los incidentes reportados, dicha capacitación recae sobre los operadores o concesionarios de la flota basados en los documentos elaborados por el fabricante o el DTPM.</p>
	Pérdida de aislamiento [N° ID: 21]	<p>1) Implementar un programa de mantenimiento preventivo basado en las recomendaciones del fabricante.</p> <p>2) Utilizar materiales de aislamiento de alta calidad y resistencia como polietileno, teflón o fibra de vidrio.</p>	<p>EN 60079-14</p> <p>Technical Standard – Attachment 101</p> <p>Hoja de rescate y seguridad de fabricante-entidades gubernamentales</p>	<p>1) Es una tarea que involucra a los equipos de mantenimiento (por obligación contractual corresponde a los operadores o concesionarios de la flota) de los buses de transporte público, siguiendo estrechamente las recomendaciones del fabricante. Este programa debe incluir inspecciones regulares de la aislación eléctrica, pruebas de integridad de sistemas y componentes críticos, además de acciones correctivas tempranas para reparar o reemplazar elementos dañados, asegurando así la seguridad operacional y la eficiencia del vehículo.</p> <p>2) El fabricante debe asegurar a través de documentos oficiales que los elementos aislantes cumplen con la normativa internacional vigente.</p>
	Vandalismo	<p>1) Reforzar las áreas críticas del autobús, como los compartimentos de baterías y sistemas eléctricos.</p> <p>2) Capacitar en el uso de protocolos de emergencia, como la desconexión segura de los sistemas eléctricos.</p>	NFPA 2	<p>1) Los fabricantes de autobuses deben colaborar con expertos en seguridad para desarrollar los refuerzos de áreas críticas, asegurando que sean efectivas sin comprometer la funcionalidad o accesibilidad para el mantenimiento. La inclusión de sistemas de vigilancia y alarmas también puede disuadir actos de vandalismo y facilitar una respuesta rápida en caso de sabotaje.</p>

⁶ Un accidente automovilístico puede ser producido por un daño al tren de potencia [N° ID: (8)], fuga de líquidos refrigerantes o lubricantes [N° ID: (12)], fallo en el sistema de frenos [N° ID: (13)] y/o daños a la batería [N° ID: (19)].

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Shock Eléctrico por alta tensión [N° ID: (1)]				Además, los operadores o concesionarios de la flota deben inspeccionar periódicamente el estado de los elementos de refuerzo. 2) Los operadores o concesionarios de la flota de buses deben realizar capacitaciones tanto a los equipos de emergencia como a su propio personal con el fin de que estos conozcan de manera clara y precisa el protocolo por el cual se interrumpe el flujo energía del vehículo. Lo anterior, debe ser en base a documentos entregados por el fabricante o el DTPM.
Fuga de hidrógeno [N°ID: (10)]	Desgaste Válvulas	1) Realizar inspecciones y mantenimientos periódicos en las válvulas y en todo el sistema de hidrógeno para identificar y reparar desgastes o daños. 2) Instalar sensores de hidrógeno (ver sección 4.3.1) en áreas críticas para detectar fugas. Estos pueden activar alarmas y sistemas de respuesta automáticos. 3) Contar con válvulas de emergencia con cierre automático en caso de una descompresión importante en la línea de hidrógeno.	ISO 23273 ASME B31.12 ISO 26142 IEC 60079	1) Es fundamental un programa de mantenimiento exhaustivo dirigido por ingenieros y técnicos especializados en sistemas de hidrógeno. Este equipo debe realizar inspecciones detalladas y mantenimientos regulares, siguiendo las directrices del fabricante, para evaluar el estado de válvulas, tuberías, y conexiones, identificando signos de desgaste, corrosión, o daño. Los procedimientos deben incluir pruebas de estanqueidad, reemplazo de componentes desgastados, y actualizaciones de seguridad, garantizando así la operación segura y eficiente del sistema de hidrógeno y previniendo riesgos para la seguridad pública y el medio ambiente. 2) Estos sensores, a cargo del equipo de ingeniería del fabricante, deben tener la capacidad de detectar de manera anticipada cualquier escape de hidrógeno. Al detectar una fuga, los sensores pondrán en marcha alarmas y sistemas automáticos de respuesta, tales como el cierre de válvulas o la activación de sistemas de ventilación, con el objetivo de controlar y reducir al mínimo el riesgo. 3) Estas válvulas deben ser diseñadas para detectar una descompresión rápida y cerrarse inmediatamente para prevenir cualquier fuga significativa. La responsabilidad de esta medida recae sobre los fabricantes, quienes deben asegurar la instalación correcta, por su parte, el equipo de mantenimiento (por obligación contractual corresponde a los operadores o concesionarios de la flota) debe realizar pruebas periódicas para verificar su funcionamiento óptimo, y mantener un programa de capacitación continua para el personal técnico, enfocándose en la rápida identificación y respuesta ante posibles incidentes.

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
<p><i>Continuación:</i> Fuga de hidrógeno</p> <p>[N°ID: (10)]</p>	Vandalismo	<p>1) Reforzar las áreas críticas del autobús, como los tanques y sistemas de almacenamiento de hidrógeno.</p> <p>2) Instalar sensores de detección de hidrógeno para identificar rápidamente cualquier fuga.</p>	<p>NFPA 2</p> <p>ISO 26142</p> <p>IEC 60079</p>	<p>1) Es crucial adoptar una estrategia integral que no solo refuerce físicamente los tanques y sistemas de almacenamiento de hidrógeno con materiales resistentes y tecnologías de detección de intrusos, sino que también se coordine estrechamente con las salidas de emergencia y sistemas de evacuación. Este enfoque garantiza que, en el evento de un incidente, se pueda realizar una evacuación rápida y segura de los pasajeros, minimizando los riesgos de lesiones. En primera instancia, el fabricante debe asegurar que el diseño sea robusto y resistente ante ataques. Organismos como 3CV debe determinar si esta protección es la ideal a través de una revisión técnica exhaustiva, en caso de que este organismo no cuente con el equipamiento o procedimientos requeridos podría hacerse por medio de empresas privadas por medio de licitación.</p> <p>2) Es una tarea que involucra la colaboración entre los fabricantes de autobuses, los operadores de flota y los equipos de mantenimiento pertenecientes a los mismos operadores. Los fabricantes deben diseñar e integrar estos sistemas en los autobuses, mientras que los operadores de flota son responsables de mantenerlos operativos. Los equipos de mantenimiento deben realizar pruebas y revisiones periódicas para asegurar su funcionamiento adecuado, permitiendo así una detección y respuesta temprana ante posibles fugas de hidrógeno.</p>
	Accidente automovilístico [N° ID: (2)]	<p>1) Incorporar estructuras de protección alrededor de los tanques y líneas de hidrógeno para absorber y disipar la energía de los impactos, reduciendo así el riesgo de daño en caso de colisión.</p> <p>2) Instalar válvulas diseñadas para cerrarse automáticamente en caso de ruptura de la línea de hidrógeno.</p>	<p>Motor Vehicle Safety Standards 304</p> <p>ISO 23273</p> <p>NFPA 2</p>	<p>1) Estas medidas son responsabilidad de los fabricantes de autobuses en colaboración con especialistas en seguridad vial. Deben integrarse de manera que complementen y no obstruyan las salidas de emergencia, asegurando así la evacuación segura de los pasajeros. Los servicios de emergencia también juegan un rol crucial, necesitando formación específica para interactuar con estos sistemas de seguridad avanzados en situaciones de accidente, para ello el fabricante debe entregar la mayor cantidad de información posible respecto a los buses al DTPM y 3CV para que estos organismos difundan dicha información a los operadores y concesionarios de flota.</p> <p>2) Esta tarea es una responsabilidad compartida entre los fabricantes de autobuses, encargados de diseñar e instalar dichas válvulas, y los equipos de mantenimiento, responsables de su revisión y asegurar su funcionamiento óptimo. La presencia de una válvula manual es esencial para los servicios de</p>

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Fuga de hidrógeno [N°ID: (10)]				emergencia, ya que les permite cortar de manera segura el suministro de hidrógeno durante las operaciones de rescate. Esto minimiza el riesgo de incendios o explosiones y facilita la evacuación segura de los pasajeros. Generalmente, esta válvula se ubica cerca del tanque de almacenamiento de hidrógeno o a lo largo de la línea de suministro principal para garantizar que sea rápidamente accesible en situaciones de emergencia. Es imperativo capacitar adecuadamente a los equipos de emergencia a través de los manuales entregados por el fabricante para que estos estén plenamente informados sobre la ubicación exacta de la válvula manual.
Peligro para la salud de los usuarios	Mal funcionamiento o sistema eléctrico ⁷	1) Instalar y mantener dispositivos de protección de circuito. 2) Implementar un sistema de detección de fallas de tierra.	IEC 60947 IEC 61111	1) Estos dispositivos deben ser instalados por los ingenieros de diseño de los fabricantes de autobuses, asegurando compatibilidad y eficacia con el sistema eléctrico del vehículo. Los equipos de mantenimiento de las operadoras de flota son responsables de realizar inspecciones y mantenimiento regulares, garantizando su funcionamiento óptimo. Los dispositivos incluyen interruptores automáticos y fusibles, protegiendo contra sobrecargas y cortocircuitos. 2) La instalación de este sistema recae sobre los fabricantes de autobuses, mientras que su mantenimiento debe ser realizado por los equipos técnicos de las operadoras de flota. Dicho sistema identifica con rapidez cualquier fallo que represente un riesgo eléctrico. En caso de detectarse alguna anomalía que indique una fuga de corriente a tierra, el sistema automáticamente alerta al sistema de control del vehículo o activa procedimientos de seguridad, tales como la desconexión de la fuente de energía afectada.
	Fuga durante repostaje ⁸	1) Desarrollar y entrenar al personal en protocolos de respuesta a fugas de hidrógeno incluyendo la evacuación del área y el cierre de válvulas de emergencia. 2) Garantizar que las áreas de repostaje cuenten con	NFPA 2 ISO 19880-1:2020 ISO 26142 IEC 60079	1) Esto abarca la pronta identificación de fugas a través de sensores electroquímicos instalados por el fabricante en lugares estratégicos, la evacuación eficaz del área por parte del personal de operaciones, y el manejo seguro de las válvulas de emergencia para contener la situación. Los responsables incluyen a los operadores de las estaciones de repostaje quienes deben dar aviso inmediatamente al detectar una fuga, posteriormente deberían activarse las válvulas de cierre automático y de no contar con estas,

⁷ El mal funcionamiento del sistema eléctrico puede producirse por un sobrecalentamiento [N° ID: (3)], un corto circuito de alta tensión [N° ID: (5)], daños a la batería [N° ID: (19)] y/o pérdidas de aislación [N° ID: (21)].

⁸ La fuga durante el repostaje corresponde a una ampliación del riesgo (10) dado que es un caso particular de una fuga de hidrógeno.

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Peligro para la salud de los usuarios		sistemas de ventilación adecuados para disipar cualquier concentración de hidrógeno, sumado a sistemas auxiliares de emergencia conectados a sensores de hidrógeno.		<p>los operadores deberían accionar la parada de emergencia. El equipo de mantenimiento de los concesionarios de flota debe revisar y reparar periódicamente los componentes críticos como conexiones y tuberías para evitar fugas por desgaste. En caso de necesitar la presencia de equipos de emergencia, es necesario que estos conozcan los sistemas de interrupción de suministro, para ello deben contar con el manual o protocolo elaborado por el fabricante. Finalmente, autoridades como la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) deben certificar que las estaciones de repostaje cumplan con la normativa de seguridad vigente.</p> <p>2) Estos sistemas deben ser diseñados por ingenieros especializados en la seguridad de entornos con riesgo de explosiones, con el objetivo principal de detectar y neutralizar rápidamente cualquier concentración de hidrógeno que pueda ser peligrosa. Los operadores de estaciones de repostaje tienen la obligación de asegurar tanto la correcta instalación como el mantenimiento periódico de estos sistemas. Además, deben organizar capacitaciones dirigidas al personal, centradas en los procedimientos de emergencia y en la operación segura de los sistemas de ventilación y de respuesta ante fugas. La cooperación entre los fabricantes de equipos, operadores, la SEC y los servicios de emergencia es fundamental para el desarrollo de protocolos de respuesta efectiva y para asegurar una infraestructura de repostaje segura tanto para los usuarios como para el medio ambiente.</p>
	Vandalismo	<p>1) Desarrollar protocolos de evacuación y asegurar que las rutas de escape estén claramente marcadas y sean accesibles para garantizar una evacuación rápida y segura de los pasajeros.</p> <p>2) Establecer sistemas de comunicación de emergencia para informar rápidamente a pasajeros y personal sobre un incidente y proporcionar instrucciones claras sobre cómo proceder.</p>	ISO 23601	<p>1) Esto implica una colaboración estrecha entre el fabricante de autobuses quién debe asegurar que las salidas de emergencia sean claras y accesibles, operadores de flotas los cuales deben estar instruidos en protocolos de evacuación especializados basados en las directrices entregadas por el DTPM, y equipos de emergencia para garantizar que las rutas no solo cumplan con las normativas de seguridad, sino que también sean fácilmente comprensibles para todos los pasajeros. La formación regular del personal y la realización de simulacros de evacuación por parte de los operadores o concesionarios de la flota, contribuyen a preparar tanto a colaboradores como a usuarios para una evacuación rápida y segura. Se recomienda que los planes de evacuación sean de conocimiento público y se difundan de manera obligatoria a los equipos de emergencia.</p>

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Peligro para la salud de los usuarios				2) Estos sistemas deben proporcionar instrucciones claras y concisas que orienten sobre las acciones a seguir, lo cual es esencial para garantizar una respuesta organizada y eficaz en situaciones de emergencia. Para su implementación efectiva, es necesaria una coordinación estrecha entre los fabricantes de autobuses, encargados de la integración tecnológica, y los operadores de flotas, responsables de la capacitación y la realización de simulacros periódicos. Adicionalmente, sería ideal que los autobuses incluidos en el programa piloto estuvieran equipados con un sistema de comunicación directa con los servicios de emergencia, facilitando una reacción más rápida y coordinada en caso de incidentes.
Daños al vehículo	Vandalismo	1) Aplicar recubrimientos antivandálicos en componentes críticos del autobús, como ventanas y paneles de control, para reducir el riesgo de daños que podrían comprometer la seguridad del vehículo. 2) Asegurar que los componentes sensibles del autobús, como el sistema de celdas de combustible a hidrógeno y los sistemas eléctricos, estén protegidos con carcasas y cerraduras para resistir impactos. Procurar en la medida de lo posible la protección total del tren de potencia del bus.	IEC 62262	1) Esta medida requiere que los fabricantes implementen una selección cuidadosa de materiales. Estos materiales no solo deben ofrecer protección contra el vandalismo, sino que también deben cumplir con las normativas de seguridad y accesibilidad vigentes. Es fundamental garantizar que estas protecciones no comprometan la visibilidad ni el acceso a las salidas de emergencia, preservando la funcionalidad esencial del vehículo para una evacuación segura. Para asegurar la efectividad y el adecuado funcionamiento de los recubrimientos que se desean implementar, es necesario realizar diversas pruebas. Estas pruebas tienen como objetivo confirmar que la medida no afecta negativamente aspectos relacionados con la evacuación de los ocupantes. Un ejemplo concreto sería la incorporación de un vidrio laminado de seguridad. Este está compuesto por varias capas intercaladas con películas de PVB o EVA, materiales que mantienen los fragmentos unidos en caso de rotura. Este diseño no solo dificulta la fractura del vidrio, protegiéndolo contra actos de vandalismo, sino que también asegura que, en caso de romperse, el vidrio se mantenga en su lugar, reduciendo el riesgo de lesiones a los pasajeros y permitiendo una evacuación segura. En caso de que los operadores de flota u organizaciones como 3CV determinen que se requiere de mayor protección en ciertas zonas, se recomienda que el diseño se realice por especialistas en seguridad vehicular (privados o parte del DTPM o 3CV) basándose en la información entregada por el fabricante con el fin de no comprometer la operación del bus.

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
Continuación: Daños al vehículo				2) El fabricante de autobuses debería colaborar con un especialista en materiales para desarrollar una carcasa de compuesto altamente resistente para el sistema de celdas de combustible a hidrógeno, que sea ligera pero extremadamente resistente a impactos. Los operadores de flotas serían responsables de asegurar que estascarcasas permanezcan cerradas y sin daños, con revisiones periódicas como parte de su mantenimiento rutinario dado que es su obligación contractual. En caso de que los equipos de emergencia requieran acceso, las carcasas y cerraduras diseñadas deberían incluir mecanismos de apertura de emergencia. Estos pueden ser códigos especiales, llaves universales distribuidas a servicios de emergencia, o sistemas de desbloqueo rápido accesibles solo para personal autorizado, garantizando así que puedan intervenir eficazmente sin retrasos.
	Accidente automovilístico [N° ID: (2)]	1) De ser posible, incorporar sistemas avanzados de asistencia al conductor, como frenado automático de emergencia y/o alerta de cambio de carril. 2) Diseñar la carrocería del autobús para absorber impactos eficientemente, utilizando materiales y técnicas de construcción recomendados internacionalmente.	ISO 26262 ISO 17987	1) Estas tecnologías, diseñadas por fabricantes de vehículos, ayudan a prevenir colisiones mejorando la reacción del autobús ante situaciones imprevistas en la carretera. Los operadores o concesionarios de la flota deben asegurar que estos sistemas se mantengan correctamente y que los conductores reciban formación sobre cómo funcionan, maximizando así la seguridad de los pasajeros y otros usuarios de la vía. 2) Esto involucra el uso de materiales avanzados como aleaciones de alta resistencia y compuestos de fibra de carbono, junto con técnicas de construcción que siguen las mejores prácticas y recomendaciones internacionales en seguridad vehicular. Los fabricantes de autobuses juegan un rol crucial en la integración de estas innovaciones durante el diseño y la construcción, mientras que los entes reguladores como 3CV aseguran el cumplimiento de los estándares de seguridad a través de rigurosas pruebas de choque. Esta medida no solo protege la integridad estructural del vehículo, sino que también salvaguarda la vida de los pasajeros y peatones, reduciendo significativamente las lesiones en caso de colisión.
	Desastre natural	1) Desarrollar planes de evacuación y respuesta de emergencia específicos para desastres naturales, siguiendo la norma ISO 22320 para la gestión de emergencias.	ISO 22320 ISO 26262	1) La colaboración entre operadores de las flotas de buses, autoridades de gestión de emergencias y servicios de emergencia locales es esencial para desarrollar planes de respuesta ante desastres naturales que sean dinámicos y capaces de adaptarse a diversos tipos de incidentes, como inundaciones, terremotos o incendios forestales. La

Riesgo	Fuente	Medidas de Control y Mitigación	Norma/ Ley/ Regulación	Quién es el responsable
<p>Continuación: Daños al vehículo</p>		<p>2) Instalar sistemas de corte de emergencia en los autobuses para aislar las celdas de combustible a hidrógeno en caso de un desastre natural.</p>		<p>realización de simulacros periódicos es crucial para verificar la efectividad de las estrategias de evacuación y comunicación en situaciones reales. Además, la capacitación continua del personal, la implementación de tecnología de seguimiento y comunicación en tiempo real, así como la inclusión de equipos de emergencia, tales como kits de primeros auxilios, extintores y herramientas de rescate, son fundamentales. Estas medidas deben complementarse con una señalización clara de las salidas de emergencia y rutas de evacuación, asegurando así una preparación integral y efectiva para responder a emergencias.</p> <p>2) Estos sistemas están diseñados para aislar automáticamente las celdas de combustible a hidrógeno en situaciones críticas, con el objetivo de prevenir potenciales riesgos de incendio o explosión al evitar la fuga de hidrógeno. Para la implementación efectiva de estas medidas, es esencial una colaboración estrecha entre los fabricantes de autobuses, quienes deben asegurar la integración de sistemas de corte eficientes y confiables, y el equipo de mantenimiento perteneciente a los operadores de flota, encargados de mantener estos sistemas en óptimas condiciones. El mecanismo de estos sistemas se basa en la detección de condiciones anormales, tales como impactos fuertes, fluctuaciones extremas en la presión del sistema de hidrógeno o la presencia de señales que indican desastres naturales. Una vez activados, se cierran válvulas automáticas que realizan un corte total del suministro de hidrógeno.</p>

5. Recomendaciones

En esta sección, se presentan las recomendaciones de este estudio a considerar en la implementación de FCEB en Chile, las cuales fueron formuladas teniendo en cuenta la revisión detallada de las normativas y protocolos consultados, la experiencia del equipo consultor y las experiencias internacionales:

- I. Establecimiento de una Comisión de Expertos: Se recomienda al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, o quien este designe, establecer una Comisión de Expertos dedicada a estudiar a fondo las normativas recomendadas y elaborar protocolos específicos para regular todas las etapas relacionadas con el hidrógeno, desde su generación hasta su repostaje, así como para el mantenimiento de los buses. Esta comisión jugará un papel fundamental en la creación de un marco regulatorio sólido y efectivo que garantice la seguridad y eficiencia de la implementación de esta tecnología en el transporte público chileno. Además, se sugiere realizar un análisis exhaustivo de la adopción de normativas en diferentes países, considerando los posibles desafíos y barreras en su implementación. Este análisis proporcionará información valiosa para abordar proactivamente los desafíos que puedan surgir durante la implementación de las normativas en Chile. Asimismo, se recomienda examinar los costos asociados con la implementación de estas normativas en el país, con el fin de tener una visión completa de la inversión requerida en formación de capital humano y adquisición de infraestructura. Por último, se insta a revisar la coherencia de la normativa propuesta con la regulación nacional existente, evitando la creación de contradicciones legales y promoviendo una integración fluida y eficaz de las normativas internacionales en el contexto nacional. Esta medida garantizará la estabilidad jurídica y fortalecerá la aceptación y cumplimiento de las normativas internacionales en Chile.
- II. Validación de Protocolos a través de Plan Piloto: los protocolos elaborados deberán ser validados mediante el plan piloto, el cual contempla la adquisición de FCEB. Esto garantizará su eficacia y aplicabilidad en condiciones reales.
- III. Priorización de Normativas Transversales: se recomienda priorizar la revisión de normativas transversales a las etapas de operación del bus, tales como la NFPA 2 [28], ISO 15916 [29], ISO 19880-1 [30], ISO 14687:2019 [98], ASME B31.12 [99], e ISO 26142 [100], para garantizar una regulación integral y efectiva.
- IV. Especificaciones Técnicas de Buses: la matriz de riesgo revela que los fabricantes de los buses juegan un rol clave para garantizar la seguridad de las personas y del bus durante la operación de este. En este sentido, se recomienda que las licitaciones incluyan las

especificaciones técnicas de los FCEB y los protocolos de seguridad, ambos en español. Esto facilitará la implementación de las medidas de control y mitigación detalladas en la Tabla 16. A su vez se sugiere que los FCEB cumplan al menos con las normas automotrices de la Tabla 17.

Tabla 17: Principales normas automotrices internacionales relacionadas con la seguridad de los FCEB recomendados [104]

Regulación o estándar	País/región	Descripción	Foco
Reglamento 134 Naciones Unidas (NU)	Unión Europea	Requisitos y ensayos para la homologación de vehículos propulsados por hidrógeno y sistemas de almacenamiento de hidrógeno	FCEV
Reglamento 79/2009 y 406/2010	Unión Europea	Homologación de vehículos de motor propulsados por hidrógeno	FCEV
Norma de seguridad de vehículos motorizados 301, 303 y 304	Estados Unidos	Requisitos sobre la integridad del sistema de combustible	FCEV
Reglamento Técnico Global GTR, UNECE, 1998	Unión Europea	Normas técnicas globales sobre vehículos, equipos y piezas. Esta regulación considera los vehículos que utilizan baterías, incluidos los híbridos, híbridos enchufables, eléctricos de batería y de celdas de combustible.	EV
Reglamento técnico global GTR 13 UNECE	Unión Europea	Requisitos y ensayos para la homologación de vehículos propulsados por hidrógeno y sus componentes Internacional	FCEV
Reglamento técnico global GTR 20 UNECE	Unión Europea	Rendimiento de los vehículos de carretera de propulsión eléctrica y sus sistemas recargables de almacenamiento de energía eléctrica.	EV
Reglamento 12, 94, 95 y 137 Naciones Unidas	Unión Europea	Requisitos de desempeño de los sistemas de propulsión eléctricos en caso de colisiones frontales, laterales o traseras	EV
Reglamento 100 Naciones Unidas	Unión Europea	Requisitos de desempeño de baterías y sistemas de propulsión eléctricos	EV
Norma de seguridad de vehículos motorizados 305	Canadá, Estados Unidos	Requisitos de desempeño para baterías y sistemas de alto voltaje en caso de colisión	EV

- V. Selección de Proveedores OEM: se recomienda que la empresa encargada de la gestión de la compra de los FCEB considere únicamente empresas OEM (Original Equipment Manufacturer – fabricante de equipo original) con casos de éxito de FCEB operando a

nivel mundial y con disponibilidad comercial. Es importante que estas empresas hayan probado y vendido FCEB durante al menos 3 años de operación continua. En la Tabla 18 se presenta un listado de empresas OEM que pueden ser revisadas para agilizar la tarea de evaluación de ofertas comerciales y disponibilidad de FCEB por parte de la entidad encargada de la gestión de compra.

Tabla 18: OEM recomendados para la adquisición de buses a hidrógeno.

OEM	Inicio de operación	Modelos FCEV	Enlace
Wrightbus	Londres desde el 2015	Hydroliner modelos: Streetdeck FCEV y Streetdeck FCEV	www.wrightbus.com
Vanhool	Londres, Versailles y Rotterdam, desde 2018, 2020 y 2017, respectivamente	A12, A13, A18, Exqui.City18, Exqui.City24	www.vanhool.com
VDL	Rotterdam, desde el 2020	Futuras FDD2-141	www.vdlbuscoach.com
AlexanderDennis	No hay información de la fecha de lanzamiento del bus FCEV	Enviro400FCEV	www.alexander-dennis.com
Caetanobus SA	Caetanobus lanzó su primer bus FCEV el 2019, este utiliza celdas de combustible Toyota.	H2.City Gold	www.caetanobus.pt
EvoBus	17 buses demostrados en Proyecto CHIC	eCitaro	www.evobus.com
Rampini	El 2022 Rampini desarrolló el autobús Hydron	Hydron bus	www.rampini.it
Solaris	El 2019 y 2022, Solaris presentó su autobús de hidrógeno Urbino 12 y Urbino 18 respectivamente.	Urbino 12 Hydrogen y Urbino 18 Hydrogen	www.solarisbus.com
Quantron	Disponibles desde el 2019 bajo pedido	QHM FCEV, FCEV Aero (ambos son camiones)	www.quantron.net
Safra	Lanzamiento y comercialización del Businova H2, el primer vehículo de hidrógeno construido en Francia	HYCITY	www.safra.fr

En la Tabla 19, se presentan las especificaciones principales de los modelos de FCEB más utilizados en Europa, EE.UU., Japón, República de Corea y China.

Tabla 19: Modelos de FCEB más utilizados en Europa, EE.UU., Japón, República de Corea y China [105]

OEM Bus	Van Hool	ENC	New Flyer	Wright	Solaris	Toyota	Hyundai	Caetano	Foton	Yinlong	Geely
País de origen	Bélgica	EE. UU.	EE. UU.	Reino Unido	Polonia	Japón	Rep. de Corea	Portugal	China	China	China
Modelo	A330 FC	Axess	XHE40	STREET DE CK FCEV Hydroliner	Urbino 12 hydrogen	Toyota FC Bus / Sora	Elec City Fuel Cell	H2.City Gold	BJ6123 FCEVCH	Fujian Golden Dragon	F12
Inicio de Producción	2019	2017	2018	2020	2020	2017	2020	2020	N/A	N/A	N/A

OEM Bus	Van Hool	ENC	New Flyer	Wright	Solaris	Toyota	Hyundai	Caetano	Foton	Yinlong	Geely
Fuel cell (FC) OEM	Ballard	Ballard	Ballard	Ballard	Ballard	Toyota	N/A	Toyota	Toyota	N/A	N/A
Modelo FC	FCvelocity-HD85	FCvelocity-HD6	FCvelocity-HD85	FCvelocity-HD85	N/A	Toyota FC Stack	N/A	Toyota FC Stack	SinoHytec	N/A	N/A
Potencia (kW)	210	150	85	85	120	228	180	60	N/A	120	N/A
Diseño	FC dominante	FC dominante	Hibrido (Batería dominante)	FC dominante	FC dominante	Hybrid (Batería dominante)	FC dominante	N/A	N/A	N/A	N/A
Tipo de batería	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Ni-metal hydride	Li-ion	Li-titan oxide	N/A	N/A	N/A
Capacidad de batería	17.4 kWh	11 kWh	100 kWh	27.4kWh	29.2 kWh	230 kWh	78.4 kWh	N/A	65 kWh	N/A	N/A
Rango (autonomía) km	350-400 km	418 km	482 km	450 km	350 km	200 km	343 km	400 km	N/A	500 km	500 km
Tamaño deposito H2	38.5 kg	50 kg	37.5 kg	27kg	1560 L	600L	34.5 kg	37.5 kg	N/A	N/A	N/A
Presión	350 bar	350 bar	350 bar	350 bar	350 bar	700 bar	700 bar	350 bar	350 bar	N/A	N/A
Tipo de deposito de H2	Tipo III	Tipo III	Tipo IV	N/A	Tipo IV	Tipo IV	Tipo IV	Tipo IV	N/A	N/A	N/A
Precio (1000 EUR)	650	1,718 - 1,963	1,039	570	650	762	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Consumo de combustible en 100 km	9-11 kg	10 kg	6.9 kg	N/A	<10 kg	N/A	6.9 kg	>6 kg	N/A	N/A	7.5 kg
Disponibilidad	83-89%	75%	75,6%	No data	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

- VI. Verificación de Índices de Contaminación y Rutas: se sugiere realizar una verificación exhaustiva, en colaboración con el fabricante, de los índices de contaminación y su compatibilidad con los límites máximos tolerados por la celda de combustible. Además, se aconseja seleccionar cuidadosamente la ruta para la prueba, favoreciendo el éxito del proceso. Para ello, es recomendable compartir y cotejar con el fabricante las características específicas de la ruta, como distancias, pendientes, radios de curvatura e irregularidades como baches o badenes. Asimismo, es fundamental considerar la participación de actores relevantes y calificados en cada etapa de la implementación, incluidas las empresas OEM. Aunque estos elementos pueden considerarse externos al funcionamiento del bus, cualquier aspecto de la cadena de suministro puede influir en la percepción y reputación de la tecnología utilizada, por lo que su elección debe realizarse con atención para garantizar el éxito del proyecto.
- VII. Formación de Talento Humano y Capacitación del Personal: es necesario que el Estado impulse la formación de talento humano a nivel técnico para adquirir competencias en la operación y mantenimiento de celdas de combustibles, sistemas de alta y baja tensión, sistemas de generación de hidrógeno, entre otros. Además, se recomienda capacitar y certificar al personal involucrado en la operación y mantenimiento de los FCEB. La entidad certificadora podría ser la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) y/o el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT).

- VIII. Benchmarking en Países Líderes: se recomienda realizar una evaluación comparativa (benchmarking) exhaustiva entre los países líderes en la adopción de FCEB, como Japón, Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Europea, con el fin de estudiar detalladamente el marco regulatorio y las mejores prácticas de operación y mantenimiento. Además, se sugiere que, en futuras revisiones, se amplíe el alcance del análisis para incluir otros países destacados en el desarrollo de tecnologías relacionadas con celdas de combustible, como Corea del Sur y China. Estos países han demostrado ser actores clave en este ámbito, superando incluso a Europa en la distribución de FCEV hasta el año 2020. Este enfoque permitirá que los estándares internacionales abarquen un espectro geográfico más amplio, reflejando así la diversidad de los avances tecnológicos a nivel mundial y proporcionando una base sólida para futuras consultas y desarrollos en este campo.
- IX. Elaboración de Protocolos Seguridad e Inspecciones: se recomienda una estrecha coordinación entre el MTT, la SEC y los servicios de emergencia, como Carabineros, Policía, Bomberos, ambulancias, paramédicos y unidades especializadas. Esta colaboración resultará fundamental para desarrollar protocolos de seguridad específicos destinados a los servicios de emergencia, garantizando así una respuesta efectiva y eficiente en situaciones críticas. Además, el MTT debe asumir la responsabilidad de elaborar protocolos de inspección y medición, basados en normativas internacionales, con el objetivo de asegurar que los FCEV cumplan con los estándares de seguridad y técnicos necesarios para circular de manera segura y legal en el país. Estos protocolos deben ser implementados tanto en el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV) como en las Plantas de Revisión Técnica (PRT). Por otro lado, la SEC debe establecer normativas que faciliten la instalación de infraestructura de recarga de hidrógeno, como hidrolíneas y/o hidrogeneras, con el fin de asegurar la disponibilidad de combustible para los buses y promover así la adopción de esta tecnología en el transporte público.
- X. Promoción y Divulgación de Beneficiarios: la Agencia de Sostenibilidad Energética debe promover y divulgar los beneficios de los buses a celdas de combustible a hidrógeno, así como crear incentivos fiscales y financieros para su adopción en el transporte público.
- XI. Actualización Continua de Medidas de Control y Mitigación: dado el constante cambio en las tecnologías, los protocolos y las medidas de mitigación se deben actualizar periódicamente. En este sentido, se sugiere cuantificar los riesgos mediante un análisis modal de fallos y efectos (FMEA) para cada uno de los subsistemas relevantes de los FCEB. También, una vez que la flota de FCEB esté operativa y se haya recopilado la información correspondiente, se recomienda migrar la evaluación de riesgos a la norma ISO 31000. Este enfoque permitirá determinar los riesgos, facilitando la elaboración de pautas de mantenimiento, programas de capacitación, protocolos de emergencia y, en última instancia, una normativa chilena especializada para FCEB. Para llevar a cabo este

análisis se debe construir un registro detallado de las fallas que se presenten durante la implementación de los programas piloto. Además, se recomienda solicitar información al fabricante y/o representante de la marca de las fallas reportadas por otros clientes, para enriquecer el análisis y garantizar una implementación exitosa de FCEB en Chile.

Estas recomendaciones buscan garantizar una implementación exitosa y segura de los FCEB en Chile, contribuyendo así a la transición hacia un transporte más limpio y sostenible.

5.1 Líneas de estudio

El equipo consultor, ha identificado siete líneas de estudios en seguridad operacional que deben ser consideradas para permitir la implementación de una flota de FCEB a corto, mediano y largo plazo, de manera segura y eficiente. Además, se sugiere que entidades deberían estar a cargo de liderar dichas líneas de investigaciones.

- I. Gestión Integral de Riesgos asociados al Hidrógeno: Investigar los riesgos asociados con el almacenamiento, manipulación y uso del hidrógeno en contextos específicos de transporte público. Esto incluiría análisis detallados de escenarios y la formulación de estrategias de gestión de riesgos. Se sugiere que esta línea podría ser liderada a corto y mediano plazo por el MTT, quien tiene entre sus funciones, supervisar la seguridad y gestión del riesgo en el sector de transporte.
- II. Infraestructura de Recarga Segura y Eficiente: Explorar tecnologías y prácticas avanzadas para el diseño y operación de estaciones de recarga de hidrógeno, con un enfoque especial en la seguridad. Esto podría incluir sistemas de detección de fugas, protocolos de seguridad y diseño de estaciones a prueba de accidentes. Se sugiere que esta línea podría ser liderada a mediano y largo plazo y de manera conjunta entre las empresas privadas que suministran las tecnologías, el MTT en coordinación con el Ministerio de Energía a través de la CNE.
- III. Programas de Formación Especializada: Desarrollar programas de formación y capacitación para conductores, personal de mantenimiento y equipos de respuesta ante emergencias (servicios de emergencias) para asegurar que estén debidamente capacitados y preparados para abordar situaciones de riesgo. Se sugiere que los programas de capacitación sean dictados por los operadores de la flota de buses, por instituciones de educación superior, con el apoyo de la empresa privada, el MTT y el Ministerio de Energía. El proceso de certificación de técnicos encargados de manipular equipamiento que usa hidrógeno como combustible, deberá ser llevado a cabo por la SEC.
- IV. Normativas y Estándares Adaptados: Contribuir al desarrollo de normativas y estándares específicos para la operación segura de buses a hidrógeno. Esto abarca desde requisitos

técnicos hasta procedimientos operativos, asegurando un marco regulatorio sólido. Se sugiere que esta línea sea liderada en el corto plazo por el INN y monitoreado y validado por la CNE.

- V. **Sistemas Avanzados de Monitoreo y Control:** Investigar en tecnologías de monitoreo en tiempo real que permitan la detección y respuesta inmediata ante posibles problemas de seguridad. Esto podría involucrar sensores avanzados, sistemas de telemetría y análisis predictivo. A mediano plazo, los proveedores de los buses en coordinación con el MTT, deberán proponer dichas estrategias en Chile. Las plantas de revisión técnica juegan un rol importante, velando que tanto el sistema de almacenamiento como el sistema de suministro de hidrogeno del bus, se encuentren en buen estado.
- VI. **Evaluación del Impacto Ambiental y Seguridad Integrada:** Analizar el impacto ambiental de las tecnologías de hidrógeno y su relación intrínseca con la seguridad operacional. Se deben desarrollar estrategias que no solo mitiguen riesgos, sino que también minimicen impactos negativos en el medio ambiente. Se sugiere que esta línea este impulsada tanto por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) y el MTT a mediano y largo plazo.
- VII. **Aprendizaje de Experiencias Internacionales:** Estudiar casos de implementación exitosa y desafíos superados en otros países que ya hayan adoptado buses a hidrógeno. Extraer lecciones aprendidas y aplicarlas localmente para mejorar la seguridad operacional. Esta estrategia deberá ser implementada a corto plazo por el MTT.

6. Conclusiones

Los vehículos pesados, especialmente los ICEV diésel, representan una fuente significativa de emisiones de gases y partículas contaminantes, con impactos negativos en la salud pública y el medio ambiente. En respuesta a esta problemática, Chile ha emprendido iniciativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, mediante la promoción de tecnologías limpias y la transición hacia fuentes de energías renovables. La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y la Estrategia Nacional de Electromovilidad son ejemplos de los esfuerzos del país para avanzar en esta dirección. En este contexto, el proyecto piloto del DTPM para la implementación de FCEB en el sistema RED representa un paso importante hacia la descarbonización del transporte público. Sin embargo, se destaca la importancia de abordar adecuadamente los desafíos relacionados con la seguridad operacional, dado que esta tecnología aún no se ha utilizado a gran escala en el país.

Este trabajo proporciona una base sólida para garantizar la seguridad en todas las etapas de operación de los FCEB en Chile. La implementación efectiva de estas medidas, junto con el establecimiento de mecanismos de seguimiento y evaluación, son necesarios para asegurar el éxito del proyecto piloto y sentar las bases para una adopción de esta tecnología en el transporte público

del país. Asimismo, la importancia crítica de garantizar un entorno de trabajo seguro en todas las etapas de la cadena de suministro y operación, desde la producción hasta el mantenimiento de los vehículos, se subraya con el análisis de los protocolos y normas técnicas de seguridad operacional. Este estudio presenta las normativas, regulaciones, políticas, protocolos y procedimientos recomendados para garantizar la seguridad operacional y la salud ocupacional en todas las fases de la cadena de valor del hidrógeno para FCEB. Se destacan estándares internacionales reconocidos, tales como la NFPA 2, ISO 15916, ISO 19880-1, ISO 14687:2019, ASME B31.12 e ISO 26142, como pilares fundamentales en este proceso. Además, se resalta la participación del Instituto Nacional de Normalización (INN) en la formulación y adaptación de normativas para impulsar el avance de la industria del hidrógeno en Chile, evidenciando un compromiso continuo con la seguridad y la calidad en este sector en crecimiento.

La gestión integral de riesgos y la colaboración entre múltiples actores permiten asegurar la viabilidad técnica y operacional en la implementación de FCEB en Santiago de Chile. La matriz de riesgos identifica amenazas específicas, como el vandalismo, resaltando la necesidad de estrategias adaptadas a los contextos locales. La interrelación de estos riesgos subraya la importancia de abordar tanto los riesgos individuales como sus posibles interacciones y causas subyacentes. Según lo indicado en la matriz de riesgos, los principales riesgos están asociados con el hidrógeno y el sistema de alta tensión del bus FCEV. La colaboración entre fabricantes, operadores de flotas y organismos reguladores como 3CV y la SEC, resulta esencial para implementar medidas de control y mitigación efectivas. Además, el suministro de información, que incluye hojas de rescate y/o fichas de intervención en accidentes de tráfico, por parte de los fabricantes a las entidades gubernamentales pertinentes, asegurará la adecuada incorporación de estas medidas en los protocolos operativos y documentos asociados. Este esfuerzo contribuirá significativamente a fortalecer la seguridad tanto de los pasajeros como del entorno urbano. La disponibilidad de esta información en español simplificará su comprensión y aplicación por parte de los usuarios.

Finalmente, las recomendaciones presentadas son fundamentales para el desarrollo exitoso de la implementación de FCEB en Chile. Desde el establecimiento de una Comisión de Expertos hasta la promoción de beneficios y la actualización continua de medidas de control y mitigación, cada sugerencia aborda aspectos clave que van desde la regulación y seguridad hasta la capacitación del personal y la divulgación de beneficios. Es crucial que el gobierno chileno y las entidades pertinentes consideren estas recomendaciones como una guía integral para garantizar una transición fluida hacia un transporte público más limpio y sostenible, sentando así las bases para un futuro más prometedor en términos de movilidad y medio ambiente en el país.

7. Referencias

- [1] F. Karagulian *et al.*, “Contributions to cities’ ambient particulate matter (PM): Asystematic review of local source contributions at global level,” *Atmospheric Environment*, vol. 120. Elsevier Ltd, pp. 475–483, Nov. 01, 2015. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.087.
- [2] Sistema Nacional de Información Ambiental, “Calidad del Aire,” 2022. Accessed: Apr. 15, 2024. [Online]. Available: <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/01/C14-calidad-del-aire-rem-a-2021.pdf>
- [3] R. Martinez Caro *et al.*, “Informe del Inventario Nacional de Chile 2022: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2020,” Nov. 2023, Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/73015>
- [4] Ministerio de Energía, “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde - Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones.” Accessed: Nov. 23, 2022. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- [5] “Estrategia Nacional de Electromovilidad”, Accessed: Oct. 08, 2023. [Online]. Available: <https://energia.gob.cl/consultas-publicas/estrategia-nacional-de-electromovilidad>
- [6] “DOCUMENTO TÉCNICO EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA IMPLEMENTACIÓN FLOTA DE BUSES DE HIDRÓGENO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE METROPOLITANO RED CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact”, Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: https://programacalac.com/wp-content/uploads/2023/07/Informe-H2_version-final-1805_compressed-1.pdf
- [7] “WP.29 - Introduction | UNECE.” Accessed: Mar. 07, 2024. [Online]. Available: https://unece.org/wp29-introduction#accordion_0
- [8] “International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy.” Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/International-trade-and-green-hydrogen-Supporting-the-global-transition-to-a-low-carbon-economy>
- [9] “Renewable hydrogen - European Commission.” Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/renewable-hydrogen_en
- [10] “World Energy Outlook 2023 – Analysis - IEA.” Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [11] F. Wang *et al.*, “A review of sulfur poisoning of solid oxide fuel cell cathode materials for solid oxide fuel cells,” *J Power Sources*, vol. 478, p. 228763, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2020.228763.
- [12] P. Dimitriou and T. Tsujimura, “A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, pp. 24470–24486, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.232.
- [13] S. K. Dwivedi and M. Vishwakarma, “Hydrogen embrittlement in different materials: A review,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 46, pp. 21603–21616, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2018.09.201.
- [14] “Assessment of energy efficiency and emissions of pollutant gases from a dual diesel-hydrogen commercial vehicle,” Master thesis, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2023.
- [15] H. Dagdougui, R. Sacile, C. Bersani, and A. Ouammi, “Hydrogen Logistics: Safety and Risks Issues,” *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*, pp. 127–148, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-812036-1.00007-X.
- [16] “International Hydrogen Fueling Stations | Hydrogen Tools.” Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/international-hydrogen-fueling-stations>
- [17] “Alternative Fuels Data Center: Hydrogen Fueling Stations.” Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen-stations>

- [18] “H2FIRST Reference Station Design Task: Project Deliverable 2-2 | Hydrogen Tools.” Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://h2tools.org/h2first-reference-station-design-task-project-deliverable-2-2>
- [19] B. D. Ehrhart *et al.*, “Hydrogen Refueling Reference Station Lot Size Analysis for Urban Sites,” Mar. 2020, doi: 10.2172/1604872.
- [20] R. Caponi, A. M. Ferrario, L. Del Zotto, and E. Bocci, “Hydrogen refueling station cost model applied to five real case studies for fuel cell buses,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Oct. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202131207010.
- [21] H. Ishaq, I. Dincer, and C. Crawford, “A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 62, pp. 26238–26264, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.149.
- [22] “PEM Electrolyser - MC Series | Nel Hydrogen.” Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://nelhydrogen.com/product/mc-series-electrolyser/>
- [23] “Atmospheric Alkaline Electrolyser | Nel Hydrogen.” Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>
- [24] “Main specifications”, Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <http://www.honda.co.jp/smartcommunity/>
- [25] “GREEN HYDROGEN COST REDUCTION SCALING UP ELECTROLYSERS TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL H 2 O 2,” 2020, Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: www.irena.org/publications
- [26] “Dual Pressure Hydrogen Refueling Station 350/700 bar | HYFINDR.” Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://hyfindr.com/en/shop/products/dual-pressure-hydrogen-refueling-station-350-700-bar>
- [27] “Gaseous Hydrogen Delivery | Department of Energy.” Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-delivery#:~:text=Gaseous%20hydrogen%20is%20most%20commonly,hydrogen%20are%20called%20tube%20trailers.>
- [28] “NFPA 2 Desarrollo del Código.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/2/2>
- [29] “ISO/TR 15916:2015 - Basic considerations for the safety of hydrogen systems.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/56546.html>
- [30] “ISO 19880-1:2020 - Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/71940.html>
- [31] “J2601/2_202307: Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles - SAE International.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2601/2_202307/
- [32] J. Q. Li, Y. Chen, Y. B. Ma, J. T. Kwon, H. Xu, and J. C. Li, “A study on the Joule-Thomson effect of during filling hydrogen in high pressure tank,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 41, p. 102678, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.CSITE.2022.102678.
- [33] R. Caponi, A. Monforti Ferrario, L. Del Zotto, and E. Bocci, “Hydrogen refueling stations and fuel cell buses four year operational analysis under real-world conditions,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 54, pp. 20957–20970, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.093.
- [34] A. Smaragdakis, S. Kamenopoulos, and T. Tsoutsos, “How risky is the introduction of fuel cell electric vehicles in a Mediterranean town?,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 35, pp. 18075–18088, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.224.
- [35] “Hydrogen at Scale for Fuel Cell Electric Buses A California Case Study,” 2019. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/2017/10/Hydrogen-at-Scale-for-Fuel-Cell-Electric-Buses-A-California-Case-Study.pdf>
- [36] S. Vengatesan, A. Jayakumar, and K. K. Sadasivuni, “FCEV vs. BEV — A short overview on identifying the key contributors to affordable & clean energy (SDG-7),” *Energy Strategy Reviews*, vol. 53, no. April, p. 101380, 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101380.
- [37] A. Magdalene, P. Shyposha, L. Freisem, and A. Pollak, “Comparative Life Cycle Assessment

- of Battery and Fuel Cell Electric Cars , Trucks , and Buses,” 2024.
- [38] R. Wei, H. Chang, S. Huang, and L. Huang, “A bibliometric analysis on safety of fuel cells: Research trends and perspectives,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 34. Elsevier Ltd, pp. 12861–12876, Apr. 22, 2023. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.211.
- [39] R. Wei, H. Chang, S. Huang, and L. Huang, “A bibliometric analysis on safety of fuel cells: Research trends and perspectives,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 34. Elsevier Ltd, pp. 12861–12876, Apr. 22, 2023. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.211.
- [40] “CHIC | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/chic#:~:text=The%20Clean%20Hydrogen%20in%20European,and%20ended%20in%20December%202016>.
- [41] “High V.LO-City | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/high-vlo-city>
- [42] “HyTransit | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/hytransit>
- [43] “3 Emotion | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/3-emotion>
- [44] “NewBusFuel | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/newbusfuel>
- [45] “JIVE | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive>
- [46] “MEHRLIN | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/mehrlin>
- [47] “JIVE 2 | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2>
- [48] “H2Bus Europe | Fuel Cell Electric Buses.” Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/h2bus-europe>
- [49] J. Nakano, “China’s Hydrogen Industrial Strategy.” 2022.
- [50] “The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council,” 2019.
- [51] “H2Motion GmbH - China Fuel Cell Bus Analysis.” Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: <https://h2motion.at/index.php/7-blog-artikel-2>
- [52] M. Waseem, M. Amir, G. S. Lakshmi, S. Harivardhagini, and M. Ahmad, “Fuel Cell-based Hybrid Electric Vehicles: An Integrated Review of Current Status, Key Challenges, Recommended Policies, and Future Prospects,” *Green Energy and Intelligent Transportation*, p. 100121, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.geits.2023.100121.
- [53] Y. Shen, H. Lv, Y. Hu, J. Li, H. Lan, and C. Zhang, “Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on onboard hydrogen storage and supply systems of hydrogen fuel cell vehicles,” *Renew Energy*, vol. 212, pp. 834–854, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.037.
- [54] A. Smaragdakis, S. Kamenopoulos, and T. Tsoutsos, “How risky is the introduction of fuel cell electric vehicles in a Mediterranean town?,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 35, pp. 18075–18088, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.224.
- [55] “ISO 19880-3:2018 - Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 3: Valves.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64754.html#:~:text=This%20document%20provides%20the%20requirements,up%20to%20the%20H70%20designation>.
- [56] “ISO 19880-8:2019 - Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 8: Fuel quality control.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69540.html>
- [57] “ISO 17268:2020 - Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/68442.html>
- [58] “J2601_202005: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles - SAE International.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/
- [59] “J2601/2_201409: Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles - SAE International.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available:

- https://www.sae.org/standards/content/j2601/2_201409/
- [60] “J2601/3_201306: Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks - SAE International.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2601/3_201306/
- [61] “J2799_201912: Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software - SAE International.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2799_201912/
- [62] “ISO 16111:2018 - Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride.” Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/67952.html>
- [63] “UNE-EN 17339:2021 Botellas para el transporte de gas. Botellas...” Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065216>
- [64] Eiga, “HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS Disclaimer”, Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: www.eiga.eu
- [65] “eCFR:: 49 CFR Part 171 -- General Information, Regulations, and Definitions.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-171>
- [66] “eCFR:: 49 CFR Part 172 -- Hazardous Materials Table, Special Provisions, Hazardous Materials Communications, Emergency Response Information, Training Requirements, and Security Plans.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-172>
- [67] “eCFR:: 49 CFR Part 173 -- Shippers—General Requirements for Shipments and Packagings.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-173>
- [68] “eCFR:: 49 CFR Part 177 -- Carriage by Public Highway.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-177>
- [69] “eCFR:: 49 CFR Part 178 -- Specifications for Packagings.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-178>
- [70] “PART 192-TRANSPORTATION OF NATURAL AND OTHER GAS BY PIPELINE: MINIMUM FEDERAL SAFETY STANDARDS NEW FORMAT For future versions of this manual, changes to the regulations will show a highlight for deletions and an underline for additions. AMENDMENT TABLE OF SECTION REVISIONS FOR THIS VERSION OF PART 192 PART 192 AMENDMENT NUMBER EFFECTIVE DATE OF AMENDMENT PARAGRAPHIMPACT IN REFERENCE TO: PIPELINE SAFETY, FIRE PREVENTION, SECURITY MEASURES”, Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <http://www.phmsa.dot.gov>
- [71] “ISO 13850:2015 - Safety of machinery — Emergency stop function — Principles for design.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/59970.html>
- [72] “ISO 19880-3:2018 - Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 3: Valves.” Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64754.html>
- [73] “IEC 60204-1:2016 | IEC Webstore.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/26037>
- [74] “ISO 22734:2019 - Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69212.html>
- [75] “DIN EN 13445-5:2010-12 | Normas AENOR.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://tienda.aenor.com/norma-din-en-13445-5-2010-12-135621313>
- [76] “J2600_201510: Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices - SAE International.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2600_201510/
- [77] Eiga, “GASEOUS HYDROGEN INSTALLATIONS.” [Online]. Available: www.eiga.eu

- [78] “Pliego Técnico Normativo RIC N° 12 SEC-División de Ingeniería de Electricidad”, Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://electricistas.cl/wp-content/uploads/2021/10/RIC-N12-Instalaciones-en-Ambientes-Explosivos.pdf>
- [79] “ISO 23273:2013 - Fuel cell road vehicles — Safety specifications — Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64047.html>
- [80] “ISO 21266-1:2018 - Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel systems — Part 1: Safety requirements.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/70340.html>
- [81] “ISO 21266-2:2018 - Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel systems — Part 2: Test methods.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/70341.html>
- [82] “ISO 19882:2018 - Gaseous hydrogen — Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64655.html>
- [83] “ISO 12619-1:2014 - Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel system components — Part 1: General requirements and definitions.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/51569.html>
- [84] “ISO 12619-2:2014 - Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel system components — Part 2: Performance and general test methods.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/51570.html>
- [85] “ISO 19881:2018 - Gaseous hydrogen — Land vehicle fuel containers.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/65029.html>
- [86] “IEC 62282-2-100:2020 | IEC Webstore.” Accessed: Jan. 06, 2024. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/59780>
- [87] “Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV) [2019/795] - Publications Office of the EU.” Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8aad3d19-7870-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en>
- [88] “1-1-4-101 Attachment 101 TECHNICAL STANDARD FOR PROTECTION OF OCCUPANTS AGAINST HIGH VOLTAGE IN FUEL CELL VEHICLES”, Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.oica.net/wp-content/uploads/attachment101.pdf>
- [89] “49 U.S. Code Chapter 301 - MOTOR VEHICLE SAFETY | U.S. Code | US Law | LII / Legal Information Institute.” Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.law.cornell.edu/uscode/text/49/subtitle-VI/part-A/chapter-301>
- [90] “eCFR:: 49 CFR 571.304 -- Standard No. 304; Compressed natural gas fuel container integrity.” Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-V/part-571/subpart-B/section-571.304>
- [91] “IEC 60079-10-1:2020 | IEC Webstore.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/63327>
- [92] Doc, “HYDROGEN VENT SYSTEMS FOR CUSTOMER APPLICATIONS.” [Online]. Available: www.eiga.eu
- [93] “BS EN 60079-14:2014 | 30 Apr 2016 | BSI Knowledge.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://knowledge.bsigroup.com/products/explosive-atmospheres-electrical-installations-design-selection-and-erection?version=standard>
- [94] “1910.103 - Hydrogen. | Occupational Safety and Health Administration.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.103>

- [95] “DOC134”, Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC134.pdf>
- [96] Eiga, “GASEOUS HYDROGEN INSTALLATIONS”, Accessed: Jan. 07, 2024.[Online]. Available: <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC015.pdf>
- [97] “Sistema de Consultas Públicas.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.consultapublica.cl/>
- [98] “ISO 14687:2019 - Hydrogen fuel quality — Product specification.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69539.html>
- [99] “B31.12 - Hydrogen Piping & Pipelines | Digital Book | 2019 | DRM Enabled PDF | ASME.” Accessed: Jan. 05, 2024.[Online]. Available: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines/2019/drm-enabled-pdf>
- [100] “ISO 26142:2010 - Hydrogen detection apparatus — Stationary applications.” Accessed: Jan. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/52319.html>
- [101] “ISO/TC 197 - Hydrogen technologies.” Accessed: Mar. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/committee/54560.html>
- [102] “INN organizó novedoso seminario/coveratorio que reunió importantes actores de la industria del hidrógeno | INN.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.inn.cl/inn-organizo-novedoso-seminariocoversatorio-que-reunio-importantes-actores-de-la-industria-del>
- [103] P. Gardoni and C. Murphy, “A Scale of Risk,” *Risk Analysis*, vol. 34, no. 7, pp. 1208–1227, 2014, doi: 10.1111/risa.12150.
- [104] OECD, “Regulations and Standards for Clean Trucks and Buses: On the RightTrack?,” 2020.
- [105] L. Bravo and L. Boillot, “Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles , Buses and Refuelling Infrastructure Projects,” 2024. doi: 10.2760/892745.
- [106] G. Korotcenkov, S. Do Han, and J. R. Stetter, “Review of electrochemical hydrogen sensors,” *Chemical Reviews*, vol. 109, no. 3. pp. 1402–1433, Mar. 11, 2009. doi: 10.1021/cr800339k.
- [107] “Tipos De Sensor De Gas Para Detectores Portátiles - Orion S.” Accessed: May04, 2024. [Online]. Available: <https://orionseguridad.es/tipos-de-sensor-de-gas-para-detector-portatil/>

Anexo I

Leyenda:

- A: Seguridad operacional
- B: Salud ocupacional
- C: Transporte del hidrógeno
- D: Repostaje del hidrógeno en tanques de almacenamiento estacionarios
- E: Repostaje de los buses
- F: Operación de los buses
- G: Mantenimiento de los equipos de generación, almacenamiento y repostaje
- H: Mantenimiento de los buses

Nº	Nombre Código	Categoría	Sistema de gestión		Etapa de Operación						Título	País Región	Breve descripción	Fuente (enlace)	
			A	B	C	D	E	F	G	H					
1	ISO 16111:2018	Procedimientos	X		X							Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride	Reino Unido	Define requisitos para el diseño, construcción y pruebas de sistemas de almacenamiento de gas hidrógeno transportables, conocidos como "ensamblajes de hidruro metálico" (MH). Aplica a ensamblajes MH recargables con volúmenes internos no mayores a 150 litros y una presión máxima de desarrollo de 25 MPa.	https://www.iso.org/standard/67952.html

2	EN 17339	Norma	X		X						Transportable gas cylinders -Fully wrapped carbon composite cylinders and tubes for hydrogen	Unión Europea	Este documento especifica los requisitos mínimos para los materiales, diseño, construcción, pruebas de prototipos e inspecciones de fabricación de rutina de cilindros y tubos compuestos para almacenar hidrógeno comprimido.	https://www.une.org/encuentra-tu-norma/b-usca-tu-norma/norma?c=N0065216
3	ASME STP/PT-0005	Instructivo Técnico	X		X	X					Design Factor Guidelines for High-Pressure Composite Hydrogen Tanks	Internacional	Este informe ofrece recomendaciones al Equipo de Proyecto de Hidrógeno de ASME para los factores de diseño de tanques de hidrógeno compuestos. El alcance de este estudio incluyó tanques estacionarios (por ejemplo, de almacenamiento) y tanques de transporte; no abarca los tanques de combustible para vehículos. El informe ofrece factores de diseño recomendados en relación con la presión de ruptura a corto plazo y los márgenes provisionales para la ruptura por estrés a largo plazo, basados en una vida útil de diseño fija de 15 años para tanques compuestos completamente envueltos y envueltos en aro con revestimientos metálicos. Estos márgenes recomendados se basan en la experiencia probada con las normas existentes para tanques reforzados con compuestos. También se proporcionan recomendaciones para investigaciones adicionales, en particular para el desarrollo de reglas que proporcionen factores de diseño dependientes de la vida útil en relación con la ruptura por estrés, lo que permitiría diseñar para vidas útiles más largas o más cortas que 15 años, y para proporcionar un método para que el fabricante determine, mediante pruebas, la relación de estrés para su sistema de refuerzo de fibra.	https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/stp-pt-005-stp-pt-005-design-factor-guideline-high-pressure-composite-hydrogen-tanks-a1610q/2006/drm-enabled-pdf

4	ASME/STP-PT-014	Instructivo Técnico	X		X	X					Data Supporting Composite Tank Standards Development for Hydrogen Infrastructure Applications	Internacional	Este documento proporciona una visión integral de la historia, desarrollo y aplicaciones de cilindros compuestos durante los últimos 50 años en sectores comerciales, vehiculares, de defensa y aeroespaciales. La industria ha continuamente adaptado nuevos materiales, procesos y enfoques de diseño, manteniendo un alto nivel de seguridad. El informe destaca la importancia de monitorear continuamente el uso en campo, incorporando cambios a las normas basadas en el conocimiento adquirido de la experiencia real. Las recomendaciones incluyen adoptar un enfoque de análisis de modos y efectos de falla (FMEA) para las normas, desarrollar estándares más orientados al rendimiento para los recipientes a presión compuestos y utilizar ratios de estrés precisos para las fibras de refuerzo para mejorar la confiabilidad. El documento también aborda el uso de programas de líderes de flotas para nuevos materiales y diseños para abordar posibles problemas de seguridad. La revisión abarca la historia del uso de cilindros compuestos en aplicaciones aeroespaciales/defensa, comerciales y vehiculares, detallando aplicaciones, materiales, normas y problemas de servicio en campo. Se exploran en detalle los requisitos basados en el rendimiento, factores de seguridad, pruebas de validación y consideraciones para la fatiga cíclica y la ruptura por estrés, con ejemplos de pruebas de laboratorio y correlaciones con la experiencia en campo.	https://www.asme.org/codes-standard/s/find-codes-standard/s/stp-014-data-supporting-composite-tank-standard-development-hydrogen-infrastructure-applications/2008/drm-enabled-pdf
5	EIGA Doc 100/11	Código	X		X	X					HYDROGEN CYLINDERS AND TRANSPORT VESSELS	Union Europea	Documento que posee recomendaciones específicas para el hidrógeno con respecto al diseño, material, fabricación, ensayo, uso y re-ensayo de cilindros y recipientes de hidrógeno de alta presión sin costura, para usar: individualmente, bundles y remolques.	https://tehnokontrol.com/pdf/metal-stress/06-Hydrogen-Cylinders.PDF

6	ASME B31.12	Norma	X		X	X	X	X	X			Hydrogen Piping and Pipelines	Internacional	<p>Establece requisitos para tuberías en servicio de hidrógeno gaseoso y líquido, así como para gasoductos en servicio de hidrógeno gaseoso. La sección de requisitos generales aborda materiales, soldadura fuerte, soldadura, tratamiento térmico, conformado, pruebas, inspección, examen, operación y mantenimiento. La sección de tuberías industriales cubre requisitos para componentes, diseño, fabricación, ensamblaje, erección, inspección, examen y pruebas de tuberías.</p> <p>Este código es aplicable a tuberías en servicio de hidrógeno gaseoso y líquido, y a gasoductos en servicio de hidrógeno gaseoso. B31.12 es aplicable hasta e incluyendo la unión que conecta la tubería con recipientes de presión y equipos asociados, pero no a los recipientes y equipos en sí mismos. También es aplicable a la ubicación y tipo de elementos de soporte, pero no a la estructura a la cual están conectados los elementos de soporte.</p>	https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines/2019/drm-enabled-pdf
7	EIGA Doc 121/14	Norma	X		X							Hydrogen Pipeline Systems	Unión Europea	<p>Proporciona pautas para la operación segura de sistemas de tuberías de transmisión y distribución de metal que transportan hidrógeno puro y mezclas de hidrógeno. Ofrece recomendaciones valiosas para aquellos que trabajan con estos sistemas.</p>	
8	PHMSA 49 CFR 171	Regulación	X		X							General information, regulations, and definitions.	EEUU	<p>Establece regulaciones generales para el transporte seguro de materiales peligrosos en el comercio</p>	

9	PHMSA 49 CFR 172	Regulación	X		X										Hazardous materials table, special provisions, hazardous materials communications, emergency response information, training requirements and security plans	EEUU	Esta parte enumera y clasifica aquellos materiales que el Departamento ha designado como materiales peligrosos para fines de transporte y prescribe los requisitos para los documentos de envío, marcado de paquetes, etiquetado y carteles de vehículos de transporte aplicables al envío y transporte de esos materiales peligrosos.	https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-172
10	PHMSA 49 CFR 173	Regulación	X	X	X										Shippers - General requirements for shipments and packagings	EEUU	Esta parte incluye: (1) Definiciones de materiales peligrosos para fines de transporte; (2) Requisitos que deben observarse al preparar materiales peligrosos para su envío por aire, carretera, ferrocarril o agua, o cualquier combinación de los mismos; y Responsabilidades de inspección, prueba y repetición de pruebas para las personas que vuelven a probar, reacondicionan, mantienen, reparan y reconstruyen contenedores usados o destinados a usarse en el transporte de materiales peligrosos.	https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-173
11	PHMSA 49 CFR 177	Regulación	X		X										Carriage by public highway	EEUU	Esta parte prescribe requisitos, además de los contenidos en las partes 171, 172, 173, 178 y 180 de este subcapítulo, que son aplicables a la aceptación y transporte de materiales peligrosos por transportistas privados, comunes o contratados por vehículo de motor.	https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-177

12	PHMSA 49 CFR 178	Regulación	X		X						Specifications for packagings	EEUU	Esta parte prescribe las especificaciones de fabricación y prueba para embalajes y contenedores utilizados para el transporte de materiales peligrosos en el comercio.	https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-C/part-178
13	PHMSA 49 CFR 192	Regulación	X		X						Transportation of natural and other gas by pipeline: minimum federal safety standards	EEUU	Esta parte prescribe requisitos mínimos de seguridad para las instalaciones de ductos y el transporte de gas, incluidas las instalaciones de ductos y el transporte de gas dentro de los límites de la plataforma continental exterior, tal como se define ese término en la Ley de Tierras de la Plataforma Continental Exterior (43 U.S.C. 1331).	https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-D/part-192
14	ISO 23273:20 13	Norma	X							X	Fuel cell road vehicles — Safety specifications — Protection against hazards for fuelled with compressed hydrogen	Internacional	Especifica requisitos esenciales para vehículos de celdas de combustible respecto a la protección de personas y el medio ambiente dentro y fuera del vehículo contra peligros relacionados con el hidrógeno. Solo aplica a FCV donde el hidrógeno comprimido se utiliza como combustible para el sistema de celdas de combustible.	https://www.iso.org/standard/64047.html
15	ISO 21266	Norma	X							X	Road vehicles. Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel systems.	Internacional	Parte I: Este documento especifica los requisitos mínimos de seguridad aplicables a la funcionalidad de los sistemas de combustible a bordo con gas comprimido de hidrógeno (CGH2) y mezclas de hidrógeno/gas natural destinados a utilizarse en los tipos de vehículos automotores definidos en ISO 3833. Parte II: Este documento especifica los métodos de prueba para verificar los requisitos mínimos de seguridad especificados en ISO 21266-1.	https://www.iso.org/standard/70340.html https://www.iso.org/standard/70341.html

16	ISO 19882	Norma	X								Gaseous hydrogen — Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers	Internacional	El alcance de este documento se limita a dispositivos de alivio de presión activados térmicamente instalados en contenedores de combustible utilizados con hidrógeno de calidad para celdas de combustible según SAE J2719 o ISO 14687 para vehículos terrestres de celdas de combustible, e hidrógeno de Grado A o superior según ISO 14687 para vehículos terrestres con motor de combustión interna. Este documento también contiene requisitos para dispositivos de alivio de presión activados térmicamente aceptables para su uso en vehículos livianos, vehículos pesados y camiones industriales como montacargas y otros vehículos de manejo de materiales, en relación con el Reglamento Global de las Naciones Unidas N.º 13.	https://www.iso.org/standard/64655.html
17	ISO 12619	Norma	X								Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blend fuel system components	Internacional	Parte I: Este documento especifica los requisitos mínimos de seguridad aplicables a la funcionalidad de los sistemas de combustible a bordo con gas comprimido de hidrógeno (CGH2) y mezclas de hidrógeno/gas natural destinados a utilizarse en los tipos de v	https://www.iso.org/standard/51569.html https://www.iso.org/standard/51570.html
18	ISO 23828	Norma	X								Fuel cell road vehicles Energy consumption measurement Vehicles fuelled with compressed hydrogen	Internacional	Este documento especifica los procedimientos para medir el consumo de energía y la autonomía de vehículos de pasajeros y camionetas de servicio ligero con celdas de combustible que utilizan hidrógeno comprimido.	https://www.iso.org/standard/78416.html
19	ISO 19881	Norma	X								Gaseous hydrogen Land vehicle fuel containers	Internacional	Este documento contiene requisitos para el material, diseño, fabricación, marcado y pruebas de contenedores recargables de producción en serie destinados exclusivamente para el almacenamiento de gas de hidrógeno comprimido para la operación de vehículos terrestres.	https://www.iso.org/standard/65029.html

20	IEC 62282-2-100:2020	Norma	X					X			Fuel cell technologies	Internacional	Establece requisitos relacionados con la seguridad para la construcción, operación en condiciones normales y anormales, y las pruebas de módulos de celdas de combustible.	https://webstore.iec.ch/publication/59780
21	SAE J2578	Norma	X		X			X			Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety	Internacional	Identifica y define las pautas técnicas preferidas relacionadas con la integración segura del sistema de celdas de combustible, los sistemas de almacenamiento y manejo de combustible de hidrógeno según lo definido y especificado en SAE J2579, y los sistemas eléctricos en el vehículo de celdas de combustible en general. Este documento se refiere al diseño general, construcción, operación y mantenimiento de vehículos de celdas de combustible.	https://www.sae.org/standards/content/j2578_200901/
22	SAE J2579	Norma	X					X			Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles	Internacional	El propósito de este documento es definir los requisitos de diseño, construcción, operación y mantenimiento para los sistemas de almacenamiento y manejo de combustible de hidrógeno en vehículos de carretera.	https://www.sae.org/standards/content/j2579_201806/
23	SAE J2990/1	Norma	X					X			Gaseous Hydrogen and Fuel Cell Vehicle First and Second Responder Recommended Practice	Internacional	Los vehículos eléctricos y los vehículos propulsados por combustibles alternativos presentan peligros diferentes para los primeros y segundos intervinientes en comparación con los motores de combustión interna convencionales que funcionan con gasolina. Los vehículos de hidrógeno (H2V), incluidos los vehículos de celda de combustible (FCV), involucrados en incidentes, pueden presentar peligros únicos asociados con los sistemas de almacenamiento de combustible y voltaje elevado.	https://www.sae.org/standards/content/j2990/1/
24	UN Regulation 134	Regulación	X					X			Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related	Union Europea	Esta regulación se aplica a: Parte I - Sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido para vehículos propulsados por hidrógeno en cuanto a su rendimiento relacionado con la seguridad. Parte II - Componentes específicos para sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido para vehículos propulsados por hidrógeno en cuanto a su rendimiento relacionado con la seguridad. Parte III - Vehículos propulsados por hidrógeno de las categorías M y N2 que incorporan sistemas de almacenamiento de hidrógeno comprimido en cuanto a su	https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R134e.pdf

										performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV)		rendimiento relacionado con la seguridad.	
25	GB/T 24548	Norma	X					X		Fuel Cell Electric Vehicles - Terminology	China	Esta norma especifica los términos y definiciones pertinentes de los vehículos eléctricos de celda de combustible. Esta norma se aplica a vehículos eléctricos y componentes que utilizan celdas de combustible de hidrógeno gaseoso.	https://www.chinesestandard.us/products/GBT24548-2009
26	GB/T 24549	Norma	X					X	X	Fuel Cell Electric Vehicles - Safety Requirements	China	Esta norma especifica los requisitos de seguridad y manuales para vehículos eléctricos de celda de combustible, sistemas clave, etc. Esta norma es aplicable a vehículos eléctricos de celda de combustible que utilizan hidrógeno gaseoso comprimido.	https://www.chinesestandard.us/products/GBT24549-2020
27	GB/T 24554	Norma	X					X		Performance test Methods for Fuel Cell System	China	Este documento especifica los métodos de prueba de las características de arranque a temperatura normal, las características de arranque en frío a baja temperatura, las características en estado estable, las características de respuesta dinámica, la eficiencia promedio dinámica, la prueba de operación a alta temperatura, la prueba de estanqueidad, la prueba de resistencia de aislamiento, la prueba de densidad de masa y potencia, etc., para motores de celda de combustible. Este documento se aplica a las pruebas de motores de celda combustible de membrana de intercambio de protones para vehículos.	https://www.chinesestandard.us/products/GBT24554-2009
28	Technical Standard - Attachment 101	Norma	X					X		TECHNICAL STANDARD FOR PROTECTION OF OCCUPANTS AGAINST HIGH VOLTAGE IN FUEL CELL VEHICLES	Japón	Esta norma técnica establece las regulaciones técnicas relacionadas con la protección contra descargas eléctricas para vehículos de celdas de combustible (excepto motocicletas con o sin sidecar) y se aplicará a todo el tren motriz (incluida la sección de corriente alterna) que tenga una sección donde el voltaje de operación sea igual o superior a 60 V DC.	https://www.oica.net/wp-content/uploads/attachment101.pdf
29	Motor Vehicle Safety Standards 301	Norma	X					X		MOTOR VEHICLE SAFETY	EEUU	El propósito de esta norma es reducir los accidentes de tráfico y las muertes y lesiones resultantes de los accidentes de tráfico.	https://www.law.cornell.edu/uscode/text/49/subtitle-V/part-

											vehicles and their components		combustible del vehículo y/o por descarga eléctrica causada por el sistema de alto voltaje del vehículo.	wp29/global-technical-regulations-gtrs	
36	ISO TR 15916	Norma	X		X	X	X	X	X	X	Basic considerations for the safety of hydrogen systems	Internacional	Reporte técnico que se enfoca en los peligros asociados al manejo y uso del hidrógeno y cómo mitigarlos.	https://www.iso.org/standard/56546.html	
37	ISO J2578:2014	Norma	X		X			X		X	Recommended practice for general fuel cell vehicle safety		Define los requisitos relativos a la integración segura del sistema de pila de combustible, los sistemas de almacenamiento y manipulación del combustible de hidrógeno. Refiere al diseño, la construcción, el funcionamiento y el mantenimiento generales de los vehículos de pilas de combustible	https://www.sae.org/standards/content/j2578_201408/	
38	SAE J2579:2018	Norma	X		X					X	Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles		Contiene requisitos de diseño, construcción, funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de almacenamiento y manipulación de combustible de hidrógeno en vehículos de carretera. Además, se definen requisitos basados en el rendimiento para la verificación de los prototipos de diseño y los sistemas de almacenamiento y manipulación de hidrógeno de producción. Se describen protocolos de ensayo complementarios (para su uso en la homologación de tipo o la autocertificación) para determinar si los diseños (y/o la producción) cumplen los requisitos de rendimiento especificados. No aborda la resistencia al impacto de los sistemas de almacenamiento y manipulación de hidrógeno.	https://www.sae.org/standards/content/j2579_201806/	
39	NFPA2 Cap 7	Norma	X							X	Hydrogen Technologies Code	EEUU	7.3.5- Entrega requisitos de mantenimiento para sistemas de distribución de GH2 consistentes en refinería, canalización, contenedores y terminales	https://link.nfpa.org/free-access/publications/2/2023	
40	IEC 60079-	Norma	X							X	X	Classification of areas -	Internacional	Parte de la norma centrada en la clasificación de áreas en las cuales se trabaja con gases o vapores peligrosos, con el	https://www.une.org/encue

	10-1										Explosive gas atmospheres		objetivo de ayudar en el apropiado diseño, construcción, operación y mantenimiento de equipamiento para ser usado en áreas peligrosas.	ntra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0068089
41	Regulation 79/2009	Regulación	X					X			Type-approval of hydrogen-powered motor vehicles	Union Europea	Establece los requisitos para la homologación de vehículos de motor respecto a la propulsión por hidrógeno y la homologación de los componentes y sistemas de hidrógeno.	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/XT/PDF/?uri=CELEX:32009R0079&from=ES
42	Regulation 406/2010	Regulación	X					X			Type-approval of hydrogen-powered motor vehicles	Union Europea	Regula la homologación de tipo CE de vehículos completos impulsados por hidrógeno. Establece normas armonizadas sobre los receptáculos de hidrógeno, incluidos los diseñados para el uso de hidrógeno líquido, para asegurarse de que se puede abastecer de hidrógeno a los vehículos en toda la Comunidad de forma segura y fiable.	https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:0001:0107:EN:PDF
43	GB/T 24548	Norma	X					X			Fuel Cell Electric Vehicles - Terminology	China	Esta norma especifica los términos y definiciones pertinentes de los vehículos eléctricos de celda de combustible. Esta norma se aplica a vehículos eléctricos y componentes que utilizan celdas de combustible de hidrógeno gaseoso.	https://www.chinesestandard.us/products/GBT24548-2009
44	GB/T 34593-2017	Norma		X				X			Test Methods of Hydrogen Emission for Fuel Cell Engine		Esta norma especifica los métodos de prueba de emisión de hidrógeno para vehículos con motores de celda de combustible. Se aplica a los vehículos con motores de celda de combustible de membrana de intercambio de protones.	https://www.chinesestandard.us/products/GBT34593-2017
45	GB/T 26990-2011	Norma	X					X			Fuel cell Electric Vehicles- On-board Hydrogen System - Specifications	China	Este documento especifica las condiciones técnicas que deben presentar los sistemas de hidrógeno a bordo de vehículos con celda de combustible, estendiéndose como "sistema" a dispositivos que incluyen llenado de hidrógeno, almacenamiento, transporte, suministro y control. Aplica solo a vehículos con sistemas donde la presión de trabajo no exceda los 35 Mpa a temperatura ambiente.	https://www.chinesestandard.us/products/GBT26990-2011

46	EIGA 211/17	Norma	X			X	X		X		Hydrogen Vent Systems For Customer Applications	Internacional	Este documento provee recomendaciones y metodologías para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas ventilación de hidrógeno utilizados para equipos ubicados en sitio del cliente.	https://www.eiga.eu/ct_documents/doc211-pdf/
47	EN 60079-14	Norma	X			X	X		X	X	Explosive atmospheres Part 14: Electrical Installations design, selection and erection	Europa	Esta parte del documento contiene requerimientos específicos para el diseño, selección, montaje e inspección inicial de instalaciones eléctricas dentro o asociadas a atmósferas explosivas.	https://knowledge.bsigroup.com/products/explosive-atmospheres-electrical-installations-design-selection-and-erection?version=standard
48	RIC-12	Norma	X			X	X		X	X	Instalaciones en ambientes explosivos	Chile	Establece requisitos de seguridad, operación y especifica reglas esenciales para el diseño, ejecución, explotación, mantenimiento y reparación que deben cumplir las instalaciones de consumo de electricidad emplazadas en ambientes explosivos en los que existe riesgo de explosión o incendio debido a presencia de sustancias inflamables.	https://electricistas.cl/wp-content/uploads/2021/10/RIC-N12-Instalaciones-en-Ambientes-Explosivos.pdf
49	CGA-G-5.5	Norma	X		X	X				X	Standards for Hydrogen Vent Systems	EEUU	Este documento provee una guía de diseño para sistemas de ventilación de hidrógeno, tanto gaseoso como líquido, en instalaciones de usuario. Provee recomendaciones para una operación segura de estos sistemas. Además proporciona información sobre producción, transporte, manejo y almacenamiento de hidrógeno a presión, hidrógeno líquido a bajas temperaturas y productos relacionados.	https://portal.cganet.com/Publication/Details.aspx?id=G-5.5
50	ISO 13850:2015	Norma	X			X	X				Safety of machinery Emergency stop function Principles for design	Internacional	Establece requisitos funcionales y principios de diseño para la función de parada de emergencia en maquinaria, independientemente del tipo de energía utilizada	https://www.iso.org/standard/59970.html
51	ISO 14687:2019	Norma	X			X	X	X			Hydrogen fuel quality - Product specification	Internacional	El documento especifica las características mínimas de calidad del hidrógeno combustible distribuido para su utilización en aplicaciones vehiculares y estacionarias.	https://www.iso.org/standard/69539.html

52	ISO 17268:20 20	Norma	X			X	X				Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices	Internacional	Este documento define características de diseño, seguridad y operación de conectores de recarga de vehículos de hidrógeno (GHLV). Incluye receptáculo, boquilla y hardware de comunicación. Válido hasta 70 MPa, excluyendo mezclas con gas natural.	https://www.iso.org/standard/68442.html
53	ISO 19880- 8:2019	Norma	X			X	X				Gaseous hydrogen Fuelling stations Part 8: Fuel quality control	Internacional	Este documento establece el protocolo para garantizar la calidad del hidrógeno gaseoso en instalaciones de distribución y estaciones de carga de hidrógeno para celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) en vehículos de carretera.	https://www.iso.org/standard/69540.html
54	ISO 19880-1: 2020	Norma	X			X	X		X		Gaseous Hydrogen Fuelling Stations Part 1: General Requirements	Internacional	Este documento establece los requerimientos mínimos de diseño, Instalación, puesta en marcha, operación, inspección y mantenimiento de estaciones de repostaje de hidrógeno gaseoso.	https://www.iso.org/standard/71940.html
55	ISO 22734	Norma	X			X			X		Hydrogen generators using water electrolysis	Internacional	El documento establece requisitos de construcción, seguridad y rendimiento para generadores de gas de hidrógeno modulares o emparejados en fábrica, que emplean reacciones electroquímicas para producir hidrógeno a partir de la electrólisis del agua. Aplicable a generadores de hidrógeno que utilizan diferentes medios de transporte iónico, excluyendo generadores que produzcan electricidad o suministren oxígeno en aplicaciones residenciales.	https://www.iso.org/standard/69212.html
56	IEC 60204- 1:2016	Norma	X			X	X				Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements	Internacional	Aborda equipos eléctricos, electrónicos y electrónicos programables para máquinas no transportables a mano durante su funcionamiento, incluyendo un grupo de máquinas que trabajan de manera coordinada	https://webstore.iec.ch/publication/26037
57	EN 13445-5	Norma	X			X	X	X			Unfired pressure vessels.	Europa	Establece reglas para el diseño, fabricación e inspección de recipientes a presión no sometidos a llama. EN 13445-5 específicamente se ocupa de la inspección y pruebas de	https://tienda.aenor.com/norma-din-en-

											Inspection and testing		estos recipientes.	13445-5-2010-12-135621313
58	SAE J2600	Norma	X			X	X				Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices	Internacional	Se aplica al diseño y prueba de conectores, boquillas y receptáculos para el suministro de hidrógeno comprimido en vehículos terrestres (CHSV)	https://www.sae.org/standards/content/j2600_201510/
59	GB 50316	Norma	X		X						Design code on industrial metal pipes	China	Este código está preparado para mejorar el nivel de diseño de las tuberías metálicas industriales y garantizar su calidad de diseño. Este código es aplicable al diseño de tuberías metálicas industriales que operan a una presión nominal igual o inferior a 42MPa y aquellas con líneas no metálicas.	https://www.chinesestandard.us/products/gb50316-2000?pos=1&sid=9aae580c4&ss=r
60	NB/T 10354-2019	Norma	X		X						Tube Trailers	China	Esta norma especifica los requisitos para materiales, diseño, fabricación, métodos de prueba, reglas de inspección, señalización y marcado, documentos de salida de fábrica, almacenamiento y transporte de remolques de tubos.	https://www.chinesestandard.us/products/NBT10354-2019
61	GB 4962-2008	Norma	X	X		X	X		X	X	Technical safety regulation for gaseous hydrogen use	China	Esta norma especifica las especificaciones de seguridad del hidrógeno gaseoso en aspectos como la aplicación, sustitución, almacenamiento, compresión y llenado, proceso de descarga, lucha contra incendios y tratamiento de emergencia, así como protección de seguridad. Esta norma es aplicable a los diversos lugares de trabajo en tierra donde se produce hidrógeno gaseoso, y no es aplicable a los lugares para el hidrógeno líquido, hidrógeno gaseoso sobre el agua y el hidrógeno utilizado en la aviación, así como al sistema de suministro de hidrógeno a bordo. Los procedimientos correspondientes durante la producción de hidrógeno pueden implementarse por referencia.	https://www.chinesestandard.us/products/gb4962-2008?pos=1&sid=a2a36bb4b&ss=r

62		Ley	X	X	X	X					The High-Pressure Gas Safety Act	Japón	El propósito de esta Ley es regular la producción, almacenamiento, venta, transporte y otros asuntos relacionados con el manejo de gases a alta presión, su consumo, así como la fabricación y manejo de sus contenedores y fomentar actividades voluntarias por parte de las empresas privadas y el Instituto de Seguridad de Gases a Alta Presión de Japón para la seguridad de los gases a alta presión, con el objetivo de asegurar la seguridad pública mediante la prevención de accidentes y desastres causados por gases a alta presión.	https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/hourei/data/HPGSA.pdf
63		Ordenanza	X		X			X			General High Pressure Gas Safety Ordinance	Japón	El ámbito de aplicación de esta Ordenanza incluye la seguridad de todo tipo de manipulación de todos los gases a alta presión, excepto los gases comprendidos en el ámbito de la Ordenanza sobre refrigeración y la Ordenanza sobre GLP y para el tipo de manipulación comprendido en el ámbito de la la Ordenanza Industrial.	https://www.khk.or.jp/Portals/0/resources/english/dl/overview_general_hpg_ordinance.pdf
64	PHMSA 49 CFR 195	Regulación	X	X							Transportation of hazardous liquids by pipeline	EEUU	Establece normas de seguridad y requisitos de informes para instalaciones de tuberías utilizadas en el transporte de líquidos peligrosos o dióxido de carbono.	https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/docs/195_Master_195_100_Highlighted.pdf
65	USCG 33 CFR 154	Regulación	X	X							Facilities transferring oil or hazardous material in bulk	EEUU	Aplica a cada instalación que tiene la capacidad de transferir petróleo o materiales peligrosos a granel hacia o desde una embarcación, cuando la embarcación tiene una capacidad total, a partir de la combinación de todos los productos a granel transportados, de 39.75 metros cúbicos (250 barriles) o más. Esta parte no se aplica a la instalación cuando está en estado de cuidador.	https://www.ecfr.gov/current/title-33/part-154
66	CSA/ANSI HGV 2-2021	Norma	X	X							Compressed Hydrogen Gas Vehicle Fuel Containers	EEUU	Esta norma contiene requisitos para el material, diseño, fabricación, marcado y pruebas de recipientes tipo HGV2 producidos en serie, recargables y destinados únicamente para el almacenamiento de gas hidrógeno comprimido para la operación de vehículos en carretera.	https://www.csa-group.org/store/product/2428597/
67	Directiva 2008/68/CE	Norma	X	X							Transporte terrestre de mercancías peligrosas	Union Europea	La presente Directiva se aplica al transporte de mercancías peligrosas por carretera, ferrocarril o vía navegable interior entre los Estados miembros o en el interior de los mismos,	https://www.boe.es/doue/2008/260/L00013-00059.pdf

74	SAE J2601-3	Protocolo	X				X				Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks	Internacional	Este documento establece requisitos de seguridad y rendimiento para dispensadores de hidrógeno gaseoso utilizados en vehículos industriales impulsados por hidrógeno	https://www.sae.org/standards/content/j2601/3_201306/
75	SAE J2799	Norma	X			X	X				Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software	Internacional	Este estándar establece los requisitos de hardware y software de comunicaciones para el abastecimiento de vehículos de superficie con hidrógeno (HSV), como vehículos de celdas de combustible, y puede utilizarse, cuando sea apropiado, con vehículos de servicio pesado (por ejemplo, autobuses) y equipos industriales (por ejemplo, montacargas) con almacenamiento de hidrógeno comprimido	https://www.sae.org/standards/content/j2799_201912/
76	ANSI/CSA HGV 4.8	Norma	X			X	X				Hydrogen gas vehicle fueling station compressor guidelines	Internacional	El estándar establece requisitos de seguridad para compresores de hidrógeno gaseoso utilizados en estaciones de servicio de combustible, enfocados en la fabricación, diseño y pruebas.	https://www.csa-group.org/store/product/703492/
77	ISO 16110-1:2007	Norma	X			X					Hydrogen generators using fuel processing technologies Part 1: Safety	Internacional	Su objetivo es cubrir todos los peligros, situaciones peligrosas y eventos significativos relevantes para los generadores de hidrógeno, con excepción de aquellos asociados con la compatibilidad ambiental (condiciones de instalación), cuando se utilizan según lo previsto y en las condiciones previstas por el fabricante.	https://www.iso.org/standard/41045.html
78	ISO 16110-2:2010	Norma	X						X		Hydrogen generators using fuel processing technologies Part 2: Test methods for performance	Internacional	Norma que proporciona procedimientos de prueba para determinar el rendimiento de sistemas de generación de hidrógeno empaquetados, autónomos o combinados de fábrica con una capacidad inferior a 400 m ³ /h a 0 °C y 101 325 kPa, denominados generadores de hidrógeno, que convierten un combustible a una corriente rica en hidrógeno de composición y condiciones adecuadas para el tipo de dispositivo que utiliza el hidrógeno (por ejemplo, un sistema de energía de pila de combustible o un sistema de compresión, almacenamiento y suministro de hidrógeno).	https://www.iso.org/standard/41046.html
79	DIN 1127-1:2011	Norma	X			X	X		X	X	Explosive Atmospheres - Explosion Prevention And Protection -	Alemania	Norma que especifica métodos para la identificación y evaluación de situaciones peligrosas que conducen a una explosión y las medidas de diseño y construcción adecuadas para la seguridad requerida.	https://webstore.ansi.org/standards/din/din11272011

										Part 1: Basic Concepts And Methodology			
80	EIGA Doc 171/12	Doc	X			X	X			STORAGE OF HYDROGEN IN SYSTEMS LOCATED UNDERGROUND	Union Europea	Este documento aborda las cuestiones de seguridad específicas del almacenamiento de hidrógeno en sistemas ubicados bajo tierra.	https://www.eiga.eu/ct_documents/doc171-pdf/
81	UNE-EN 17533	Norma	X						X	Hidrógeno gaseoso Botellas y tubos para almacenamiento estacionario	Union Europea	Este documento especifica los requisitos para el diseño, fabricación y ensayos de botellas, tubos y otros recipientes a presión, ya sean individuales o conectados a un colector de acero, acero inoxidable, aleaciones de aluminio o materiales de construcción no metálicos.	https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065816
82	EIGA 15/06	Código	X			X	X			GASEOUS HYDROGEN STATIONS	Union Europea	This Code of Practice has been prepared for the guidance of designers and operators of gaseous hydrogen stations. It is considered that it reflects the best practices currently available. Its application will achieve the primary objective of improving the safety of gaseous hydrogen station operation.	https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwicqJjis6EAxWgr5UCHVInDmwQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fh2tools.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2FDoc15_06_GaseousHydrogenStations.pdf&usq=AOvVaw1-5fkRatLT1NCPIAeLYvi7&opi=89978449

Anexo II

Sensor electroquímico de hidrógeno

Los sensores electroquímicos de hidrógeno son particularmente valorados por su capacidad para detectar bajas concentraciones de hidrógeno, una propiedad crítica para la prevención de riesgos en ambientes donde incluso pequeñas fugas pueden ser peligrosas. Esta sensibilidad es esencial no solo en aplicaciones industriales, sino también en el transporte y estaciones de repostaje de hidrógeno, como los FCEB.

La capacidad de detectar concentraciones bajas de hidrógeno es importante para intervenir antes de que los niveles alcancen el límite inferior de inflamabilidad, además, se recomienda que las alarmas se activen en dos umbrales diferentes, a un 25% y un 60% del límite inferior de inflamabilidad. De esta forma se pueden tomar medidas automáticas como apagar los sistemas para evitar fuentes de ignición o activar la ventilación forzada. Los sensores electroquímicos permiten una supervisión continua y precisa, alertando sobre cualquier fuga y proporcionando la oportunidad de abordarla de manera inmediata. Esto no solo protege a los pasajeros y al personal, sino que también previene daños al vehículo y posibles interrupciones en el servicio. Por su parte, en las estaciones de repostaje, también se requiere monitorear las concentraciones de hidrógeno para mantener un ambiente seguro tanto para los operadores como para los clientes. En las estaciones, donde el hidrógeno se almacena y se transfiere a presiones elevadas, puede haber fugas que, si no se detectan rápidamente, podría ser peligroso. La capacidad de estos sensores para operar en un amplio rango de condiciones climáticas y su robustez ante las variaciones ambientales los hacen especialmente adecuados para su uso tanto en interiores como exteriores. Además, su bajo mantenimiento asegura que pueden proporcionar un monitoreo confiable a largo plazo con pocas intervenciones, manteniendo los costos operativos bajos y garantizando la seguridad continuamente. Estos sensores cumplen con las normas ISO 26142 y IEC 60079-29-2.

La elección de sensores electroquímicos de hidrógeno sobre otros tipos de sensores, como los termoeléctricos o los semiconductores, se debe a varias ventajas comparativas. Principalmente, los sensores electroquímicos ofrecen una mayor selectividad y sensibilidad específica para el gas que se busca detectar. Esto resulta vital en ambientes donde la presencia de otros gases podría interferir con la detección precisa. Además, tienen un bajo consumo de energía, lo cual es ideal en aplicaciones portátiles o en situaciones donde los recursos energéticos son limitados. Su robustez y fiabilidad a largo plazo también superan a menudo a otros tipos de sensores, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales y de transporte donde la durabilidad es esencial. Por estas razones, los sensores electroquímicos son frecuentemente la opción preferida para el monitoreo y la detección de hidrógeno en una variedad de contextos críticos.

Para más información sobre la operación y aplicaciones de los sensores electroquímicos de hidrógeno, ver "Review of Electrochemical Hydrogen Sensors" [106] por Korotcenkov et al. Finalmente, en la Figura 8 se presenta un esquema general de este tipo de dispositivos.

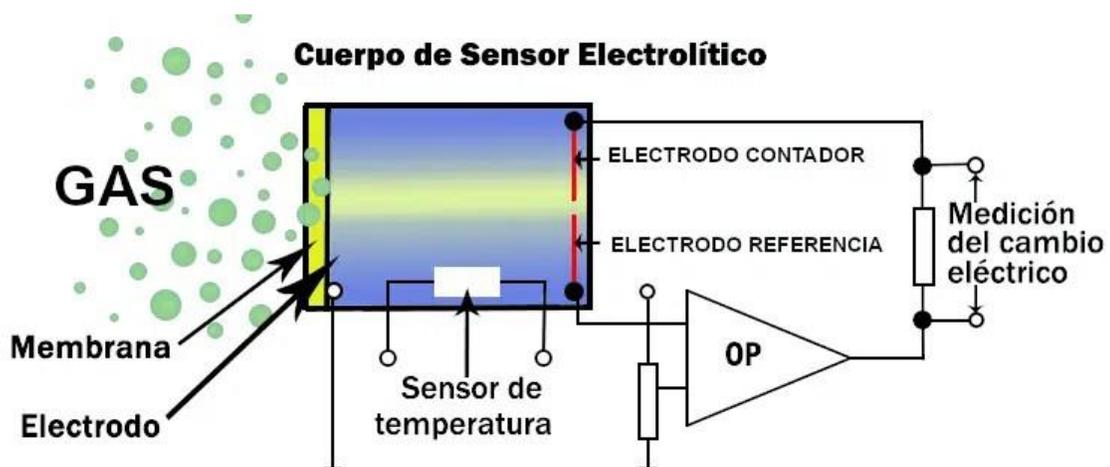


Figura 8: Esquema sensor electroquímico para detección de hidrógeno [107].



Es un Programa de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE**

Ejecutado por:



calac@swisscontact.org.pe

www.programacalac.com

Facebook: @CALACplus

Twitter: @Calacplus

Calle José Gálvez N° 692, Miraflores

Lima 15073 – Perú

Teléfono: +511 5005075

www.swisscontact.org