

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA EN
LA UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO COMO
FUENTE ENERGÉTICA EN TRANSPORTE
TERRESTRE NACIONAL

María Jesús Mancilla Cofré

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

Profesor guía: Dr. Ing. Mauricio Osses

Co-guía: Ing. Pilar Henríquez Salazar

Enero 2021

Agradecimientos

A mis padres, Jeannette y Carlos por su apoyo y amor incondicional en todos los momentos de mi vida, por creer en mí y por darme la posibilidad de acceder a una educación de calidad en un país donde eso aún es un privilegio de pocos. Y por supuesto a mi familia entera por todo el cariño y compañía que siempre me han dado.

Agradezco a Daniel mi fiel compañero, por todo su amor, cariño y apoyo en cada momento, por incentivarme a cumplir mis sueños y ser cada día una mejor persona, y sobre todo por creer y confiar en mí.

A mis amigas del alma, mujeres poderosas que admiro y me inspiran día a día a luchar por nuestros derechos en esta sociedad machista y desigual, y por brindarme una amistad llena de compañerismo y amor. También a todo/as mis amigo/as que han estado presentes desde el inicio y durante todos estos años acompañándome.

A mi profesor guía Mauricio que ha sido una fuente de inspiración en todo el camino universitario, a quien agradezco por creer en mis capacidades y mi valor como persona, y por ser uno de los referentes más importantes para mi formación profesional. Asimismo, agradezco a Pilar por su apoyo y motivación durante todo el trabajo, y por creer en mí intelectualmente más de lo que yo misma creo, ha sido una referente femenina poderosa que me ha enseñado muchísimo.

A mis amigos y amigas que tuve la fortuna de conocer en la universidad y que estuvieron brindando su apoyo, ánimo y cariño en los momentos más difíciles, y que además son los únicos que comprenden todo el sacrificio que hubo detrás del proceso.

Un especial reconocimiento a mis compañeras de equipo de Apriétame la Tuerca por disfrutar del fútbol y compartir tantas alegrías dentro y fuera de la cancha en los últimos años universitarios.

Por último, a todos y todas quienes luchan por un mundo mejor y una sociedad más justa.

Resumen

El siguiente documento presenta el desarrollo del estudio de factibilidad técnica en la utilización de hidrógeno como fuente de potencia en el transporte terrestre nacional, específicamente en buses urbanos de movilidad pública. Lo anterior se realizó con el fin de demostrar que el uso de este combustible es una solución y un pilar fundamental a contemplar en la transición energética del país hacia la descarbonización de la matriz.

Para llevar a cabo la investigación, en primer lugar, se hizo una revisión del contexto previo y actual de la tecnología, junto con la proyección esperada en el mediano y largo plazo para su despliegue a gran escala a nivel mundial y local. Sumado a ello, se consideró como eje central el estudio bibliográfico internacional debido a que el uso de celdas de combustible es aún una tecnología inmadura en Chile. A partir de esto se pudo hacer una descripción completa del principio de funcionamiento técnico de los vehículos, los dispositivos que los componen, la infraestructura de recarga necesaria para su operación, y los sistemas de seguridad precisados para un uso óptimo.

En segundo lugar, mediante el análisis de actores impulsores de la electromovilidad y el uso del hidrógeno como vector energético en Chile, se determinó que la utilización de celdas de combustible en los buses urbanos del sistema público para Santiago podría ser una potencial solución ante el objetivo de electrificar la flota completa de esta categoría vehicular para el año 2040.

Posteriormente, se efectuó un estudio de caso para Santiago en el que se simuló el ingreso paulatino, con una fase de baja escala y otra a gran escala, de una flota de buses de celdas de combustible al sistema de transporte público, a través de la homologación de la operación actual de los buses eléctricos de batería. A partir de esto se determinó la demanda diaria de hidrógeno por la flota final, correspondiente a $9.000 [kg_{H_2}]$, el tiempo destinado a la recarga de cada bus, con un promedio de $15 [min]$, el requerimiento eléctrico estimado de $455 [\frac{MWh}{día}]$ y un consumo de $85.000 [\frac{L_{agua}}{día}]$ para la producción del combustible en el mismo sitio de aparcamiento de los vehículos. Por último, se calculó el costo nivelado del hidrógeno para cada fase del proyecto, resultando un valor de $5,46 [\frac{€}{kg_{H_2}}]$ para la fase 1 y $5,64 [\frac{€}{kg_{H_2}}]$ para la fase 2. Estos resultados representan una referencia importante para futuros proyectos de la misma índole, que por lo demás, son muy similares a los valores encontrados en proyectos europeos enfocados al transporte urbano público.

Finalmente, se proyectó la demanda de hidrógeno verde para el año 2050 solicitada específicamente por transporte vial público, considerando que en dicho año la flota será completamente eléctrica y que el 40% de los buses utilizará celdas de combustible como fuente de potencia, obteniendo un valor de $70 [\frac{ton_{H_2}}{día}]$. Del mismo modo, se proyectó el costo de suministro del hidrógeno, el cual depende directamente del costo de la electricidad renovable y que se espera tenga una reducción del 52% para la zona centro del país y, por consecuencia el comportamiento del combustible verde debiese disminuir en la misma proporción.

Abstract

The following document presents the development from the technical feasibility research in the use of hydrogen as a source of power in national land transport, specifically in urban buses of public movility. This was done in order to demonstrate that the use of this fuel is a solution and a fundamental pillar to consider in the country's energy transition towards decarbonization of the matrix.

To carry out the research, in first place, a review was made of the previous and current context of the technology, along with the expected projection in the medium and long term for its large-scale deployment at the global and local levels. In addition to this, the international bibliographic study was considered as the central axis due to the use of fuel cells stills considerers as an immature technology in Chile. According to this, a complete description of the technical operating principle of the vehicles, the devices that compose them, the recharging infrastructure necessary for their operation, and the security systems required for optimal use could be made.

On second place, by analyzing the driving forces behind electromobility and the use of hydrogen as an vector energy in Chile, it was determined that the use of fuel cells in the urban buses of the public system for Santiago could be a potential solution to the objective to electrify the entire fleet of this vehicle category by 2040.

Subsequently, a case study was carried out for Santiago in which the gradual entry, with a low-scale phase and another on a large scale, of a fleet of fuel cells buses to the public transport system was simulated, through the homologation of the current operation of battery electric buses. From this, the daily hydrogen demand for the final fleet was determined, corresponding to 9,000 [$kg H_2$], the time allocated to recharging each bus, with an average of 15 [min], the estimated electrical requirement of 455 [MWh / day] and a consumption of 85,000 [L_{water} / day] for the production of fuel in the same parking place for the vehicles. Finally, the level cost of hydrogen was calculated for each phase of the project, resulting in a value of 5.46 [$€ / (kg H_2)$]for phase 1 and 5.64 [$€ / (kg H_2)$] for phase 2. These results represent an important reference for future projects of the same nature, which are otherwise very similar to the values found in European projects focused on public urban transport.

At last, the green hydrogen demand was projected for the year 2050 specifically requested by public road transport, considering that in said year the fleet will be completely electric and that 40% of the buses will use fuel cells as a power source, obtaining a value of 70 [$ton H_2 / day$]. In the same way, the cost of hydrogen supply was projected, which depends directly on the cost of renewable electricity and is expected to have a reduction of 52% for the central area of the country and, consequently, the behavior of green fuel should decrease in the same proportion.

Glosario

BEB	:	Battery Electric Bus (bus eléctrico de batería)
CORFO	:	Corporación de Fomento de la Producción
FCEB	:	Fuel Cell Electric Bus (bus eléctrico de celda de combustible)
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
HFC	:	Hydrogen Fuel Cell (celda de combustible de hidrógeno)
LCOE	:	Levelized Cost of Energy (costo nivelado de la energía)
LCOH	:	Levelized Cost of Hydrogen (costo nivelado del hidrógeno)
PEM	:	Proton Exchange Membrane (membrana de intercambio protónica)
TPRD	:	Thermally Activated Pressure Relief Device (dispositivo de alivio de presión activado térmicamente)

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Glosario	5
Índice general	6
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	9
Índice de gráficos	9
Introducción	10
Objetivos	12
Capítulo 1: Estado del arte del hidrógeno como combustible en movilidad.....	13
1.1. Contexto internacional	13
1.2. Estado actual en Chile y oportunidades para el desarrollo.....	16
1.3. Tecnología de celdas de combustible aplicada a transporte terrestre.....	18
1.3.1. Principio de funcionamiento	18
1.3.2. Principales módulos dentro del vehículo.....	19
Capítulo 2: Metodología.....	26
2.1. Descripción general.....	26
2.2. Estudio bibliográfico e investigación en GIZ.....	28
2.3. Identificación de actores para el uso de hidrógeno en Chile	28
2.3.1. Instituciones y agrupaciones líderes en electromovilidad a nivel nacional.....	29
2.3.2. Potenciales categorías vehiculares para el análisis.....	29
2.4. Descripción técnica de FCEB	29
2.5. Aplicación Caso de estudio en Santiago	30
2.5.1. Cálculo energético y operacional	30
2.5.2. Estimación de costos e insumos de producción de combustible	31
2.6. Proyección al 2050.....	32
2.6.1. Tamaño de flota estimado y suministro de combustible	32
2.6.2. Diagnóstico de costos.....	33
Capítulo 3: Análisis técnico del uso de la tecnología en buses urbanos de transporte público.....	34

3.1.	Estructura y características de un FCEB	34
3.2.	Principales beneficios de la tecnología	36
3.3.	Infraestructura de reabastecimiento.....	37
3.3.1.	Tipos de estaciones.....	38
3.3.2.	Módulos y configuración	38
3.4.	Consideraciones de seguridad	44
3.4.1.	Propiedades del hidrógeno y riesgos asociados a su uso como combustible	44
3.4.2.	Comparación de riesgos con otros gases combustibles.....	46
3.4.3.	Sistemas de seguridad en vehículos	48
3.4.4.	Sistemas de seguridad en estaciones de recarga.....	51
3.4.5.	Normativa y códigos regulatorios	51
Capítulo 4:	Estudio de caso para la ciudad de Santiago de Chile	53
4.1.	Actores públicos y privados de la electromovilidad en Chile	53
4.2.	Contexto actual del sistema de transporte público de la ciudad.....	58
4.3.	Resultados y parámetros técnicos.....	59
4.4.	Diagnóstico económico asociado a la producción del combustible	66
Capítulo 5:	Proyección de la demanda de hidrógeno en transporte terrestre al año 2050.....	69
5.1.	Cantidad de hidrógeno demandado para la flota futura de FCEB.....	69
5.2.	Diagnóstico de costos asociado a la demanda proyectada	70
Capítulo 6:	Conclusiones y recomendaciones.....	72
6.1.	Generales.....	72
6.2.	Específicas.....	73
6.3.	Recomendaciones.....	75
Referencias		76
Anexos.....		80
Anexo 1:	Especificaciones técnicas de FCEB y BEB.....	80
Anexo 2:	Cálculo de potencia eléctrica instalada.....	81
Anexo 3:	Consideraciones para el cálculo de LCOH.....	82
3.1.	Costos utilizados	82
3.2.	Supuestos para el análisis	83

Índice de figuras

Figura 1: Emisiones globales de GEI por sector económico.	10
Figura 2: Mapa mundial del parque vehicular en la actualidad, considerando un rango de años entre 2018-2020.	14
Figura 3: Mapa mundial del parque vehicular en proyección, considerando el desarrollo hasta el año 2030.	15
Figura 4: Distribución actual y proyectada de las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno a nivel mundial.	16
Figura 5: Esquema resumen del principio de funcionamiento de un FCEV.	19
Figura 6: Diagrama descriptivo de la composición de un FCEV.	20
Figura 7: Contenedor de hidrógeno gaseoso utilizado en el vehículo Toyota Mirai, correspondiente a cilindro tipo IV.	21
Figura 8: Esquema de una celda de combustible tipo PEM.	22
Figura 9: Inversor y motor eléctrico ELFA, y batería eléctrica, utilizados comúnmente en los FCEV.	24
Figura 10: Diagrama de la metodología implementada en el trabajo de investigación.	27
Figura 11: Diagrama metodológico utilizado en el análisis de actores a nivel nacional de electromovilidad y uso de hidrógeno en el transporte terrestre.	28
Figura 12: Esquema de un bus de celdas de combustible a hidrógeno.	35
Figura 13: Esquema representativo de los módulos presentes en una estación de repostaje de hidrógeno.	38
Figura 14: Medios de transporte empleados para la distribución del combustible desde la planta de origen hasta la estación de reabastecimiento.	40
Figura 15: Representación gráfica de una estación de recarga especializada para buses dentro del terminal de estos, utilizando el método de electrólisis y reformado de metano en la misma instalación, para la producción del combustible.	43
Figura 16: Ilustración representativa de un cilindro de almacenamiento de hidrógeno gaseoso, empleado en los vehículos.	50
Figura 17: Diagrama ilustrativo que muestra las principales metas establecidas en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile.	57
Figura 18: Diagrama descriptivo de las etapas llevadas a cabo en el despliegue de la flota de FCEB dentro de un rango de 5 años.	60
Figura 19: Gráfico de la proyección del costo nivelado de electricidad renovable [USD/MWh] hasta el año 2050.	71

Índice de tablas

Tabla 1: Condiciones óptimas de presión, temperatura, humedad y proporción de gases reactantes para la celda de combustible tipo PEM.....	23
Tabla 2: Especificaciones técnicas del bus Solaris Urbino 12 H2 y Xcelsior Charge H2.	36
Tabla 3: Principales códigos y normas implementadas a nivel mundial para el manejo adecuado del hidrógeno en el transporte.....	52
Tabla 4: Actores de electromovilidad en Chile, provenientes del sector de la academia.	54
Tabla 5: Actores de electromovilidad en Chile, provenientes del sector público.	54
Tabla 6: Actores de electromovilidad en Chile, provenientes del sector privado.	55
Tabla 7: Estimación de la distancia diaria a recorrer por cada bus, en promedio	61
Tabla 8: Estimación del consumo diario, en promedio, para un bus de celda de combustible.	62
Tabla 9: Consumo diario de combustible de la flota completa de buses de acuerdo con la etapa de expansión en curso	62
Tabla 10: Estimación de los tiempos considerados para la carga de cada bus, incluyendo la maniobra de la llegada de los vehículos hasta el dispensador.....	63
Tabla 11: Estimación de los tiempos considerados para la carga de la flota completa de buses, en base a la cantidad de dispensadores disponibles en la estación.....	63
Tabla 12: Requerimiento de electricidad y agua para la producción de hidrógeno por kilogramo..	65
Tabla 13: Requerimiento de electricidad y agua para la producción de hidrógeno por kilogramos consumidos según el tamaño de la flota de buses, diario y anual	65
Tabla 14: Datos utilizados para el cálculo de la proyección del tamaño de la flota de buses públicos al año 2050.	69
Tabla 15: Resultado obtenido para el número de FCEB estimados al año 2050 en la flota de transporte público de la ciudad de Santiago.....	69
Tabla 16: Especificaciones técnicas de dos FCEB usualmente utilizados en proyectos de movilidad pública en Europa, y dos BEB que actualmente son parte del sistema de transporte público de Santiago.....	80
Tabla 17: Costos capitales de los equipos considerados para el análisis.	82
Tabla 18: Costos operacionales variables considerados para el análisis, correspondiente al consumo de electricidad y agua utilizados en el proceso de electrólisis	82
Tabla 19: Costos operacionales fijos considerados para el análisis, correspondiente a la mantención de los equipos.....	82

Índice de gráficos

Gráfico 1: Densidad de diferentes gases combustibles, con respecto a la densidad del aire.	47
Gráfico 2: Rango de inflamabilidad de diferentes gases combustibles.....	47
Gráfico 3: Temperatura de autoignición de diferentes gases combustibles	48

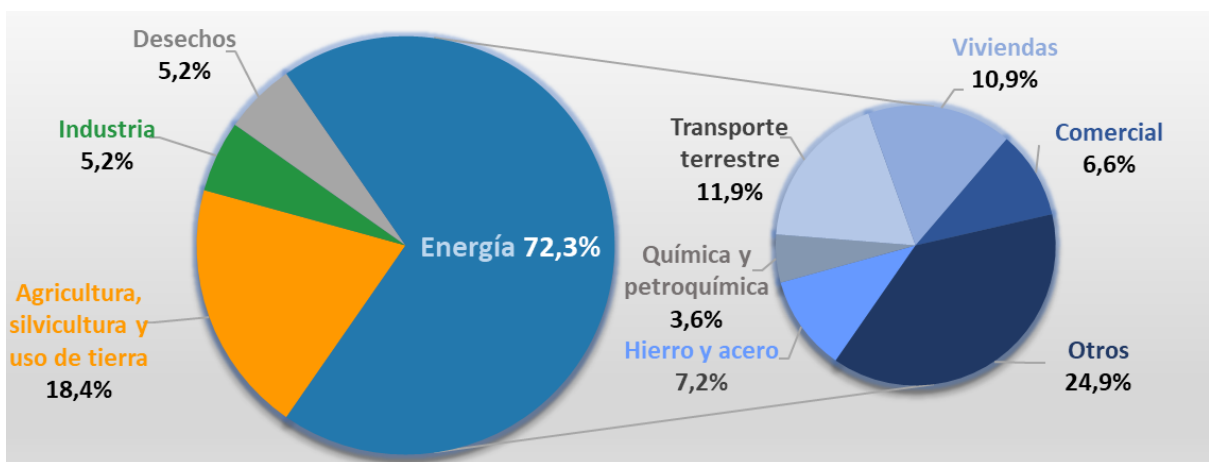
Introducción

La crisis climática que afecta a la Tierra se ha agudizado en las últimas décadas dejando secuelas graves en la flora y fauna del ecosistema natural. Este fenómeno se produce por la excesiva emisión de gases tóxicos y/o del tipo efecto invernadero (también denominados *GEI*) como consecuencia, en su mayoría, de la actividad humana y dentro los cuales el dióxido de carbono (CO_2) es el gas con mayor predominancia, seguido del metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y los hidrofluorcarburos (*HFC*).

Asimismo, la calidad del aire es otro problema que afecta a gran parte de la población, provocando deterioro del suelo y su vegetación, y daños en la salud de las personas y animales. En este aspecto, los gases anteriormente nombrados también son responsables de ello, pero la principal causa es la emisión de material particulado de 2,5 [μm] de diámetro aproximado (MP2,5), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2), emitidos como resultado de la actividad industrial y el uso de medios de transporte y calefacción residencial basado en la combustión de combustibles fósiles y/o leña.

En la **Figura 1** se presentan las principales fuentes emisoras de GEI según el sector económico, a partir de la cual se puede observar que uno de los mayores responsables es el energético con un 73,2% de las emisiones globales, y dentro del cual el 11,9% se atribuye al transporte terrestre. En relación a ello, las zonas urbanas son las más influyentes en cuanto a la calidad del aire, ya que suelen concentrar una gran cantidad de vehículos que utilizan combustibles fósiles para su propulsión.

Figura 1: Emisiones globales de GEI por sector económico.



Fuente: Ritchie, H (2020). Publicado en ourworldindata.org con datos de Climate Watch y el World Resources Institute. [1]

En cuanto al contexto local que se vive en Chile, según el último informe de Germanwatch *Climate Change Performance index* publicado en 2020 [2], el país se posiciona en el lugar número 87 de un total de 183 en relación al índice de riesgo climático mundial, además de presentar un alza de 2,6% en las emisiones de GEI per cápita en los últimos años debido al mayor consumo de combustibles fósiles. Adicionalmente, gran parte de la población se concentra en la ciudad de Santiago¹ generando una intensa congestión vehicular, por lo que la mala calidad del aire es una problemática que debiese ser atendida de manera prioritaria ante la necesidad de mitigar y revertir los daños de la crisis climática.

Ante la situación que se vive en el mundo entero, son varias las naciones que ya se encuentran en una transición energética hacia la carbono neutralidad, optando por fuentes de energía limpia, optimizando el uso de recursos naturales e implementando nuevas tecnologías de movilidad eléctrica. En este ámbito, Chile no se ha quedado atrás y también se ha planteado el objetivo de ser carbono neutral para el año 2050, para lo cual se busca concretar en el corto y mediano plazo ciertas medidas que permitan cumplir lo deseado. Entre estas, se encuentra el cierre paulatino de centrales termoeléctricas a carbón, el aumento en el uso de energías renovables no convencionales en la matriz energética, implementación de electromovilidad en el parque vehicular público y privado, entre otros.

Con respecto al problema específico que se da en Santiago en relación a la contaminación del aire producto de la congestión vehicular, apuntar hacia mejorar y renovar los buses urbanos con tecnologías de electromovilidad podría ser un objetivo a concretar en el corto plazo, ya que desde el Ministerio de Transporte se anunció la meta de electrificar por completo la flota de buses de transporte público para el año 2040. Si bien, en el transporte público ya ha ingresado de manera gradual la electromovilidad con la entrada de buses eléctricos de baterías de litio a la flota vehicular, para contar con un parque 100% eléctrico será necesario complementar esta tecnología con alguna de mayor capacidad energética y autonomía, y que además posea una mayor velocidad de carga.

Tecnologías más recientes como el hidrógeno y las celdas de combustible se presentan como una solución y un complemento para llevar a cabo los cambios antes mencionados, debido a su gran densidad energética que permite reemplazar de la misma forma las funciones que hoy cumplen los combustibles convencionales, en términos de autonomía y logística operacional, al tener una alta velocidad de carga de combustible, y a su baja, o nula, emisión contaminante a la atmósfera dependiendo de la fuente primaria de energía.

En ello, Chile es uno de los países con mayor potencial de producción de hidrógeno verde (aquel proveniente de energías renovables) y está en la mira hoy en día a nivel mundial para convertirse en el gran exportador de este combustible, ya que cuenta con abundantes recursos naturales por medio de los cuales se puede obtener energía de manera limpia y a costos competitivos.

Es así, como durante el mes de noviembre del presente año 2020 el Ministerio de Energía, con el apoyo del sector privado, público y la academia, desarrolló y publicó la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en la cual se pretende forjar una economía basada en la industria de este combustible para descarbonizar la matriz energética, y posicionar al país como el principal exportador a nivel

¹ Santiago es la capital de la Región Metropolitana, la cual concentra aproximadamente el 40% de la población nacional. Información disponible en el siguiente link: <http://www.subdere.gov.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-metropolitano-de-santiago>.

mundial [3]. Esto se presenta como oportunidad clave para proponer e impulsar el uso de la movilidad eléctrica mediante las celdas de combustible a hidrógeno.

La Universidad Técnica Federico Santa María en conjunto con el Ministerio de Energía, con el objetivo de impulsar la electromovilidad en el país, han estado trabajando en la creación de una plataforma web² pública que permita educar, informar y fomentar el uso de la movilidad eléctrica y eficiente hacia la ciudadanía. A raíz de este proyecto, surge este trabajo de memoria basado en la investigación y el análisis de factibilidad del uso de las celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia para el transporte terrestre de Chile, con un enfoque específico en los buses urbanos públicos de la ciudad de Santiago.

Cabe mencionar, que con este estudio fue posible la elaboración, en forma paralela, de un documento técnico para la agencia alemana Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH titulado “Aplicación de celdas de combustible a hidrógeno en buses de transporte público” [4].

Objetivos

El objetivo general de este trabajo de memoria es evaluar la factibilidad de la utilización de hidrógeno como fuente energética en el transporte terrestre nacional.

Para cumplir con este objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Examinar el contexto nacional e internacional de la utilización de hidrógeno en el transporte público y privado.
2. Identificar los actores principales del uso de hidrógeno como combustible para movilidad terrestre, dentro del territorio nacional.
3. Realizar un análisis energético y operacional para una flota de vehículos en base a hidrógeno que hayan sido identificados en el punto anterior.
4. Estimar la potencial demanda de hidrógeno para el transporte terrestre nacional al año 2050.
5. Establecer un diagnóstico de costos relacionados al suministro de combustible en base a hidrógeno.

² Plataforma de electromovilidad disponible en el link <https://energia.gob.cl/electromovilidad>.

Capítulo 1: Estado del arte del hidrógeno como combustible en movilidad

En este capítulo se revisa, en primer lugar, el contexto mundial y local del hidrógeno y sus aplicaciones, identificando las tendencias históricas de su uso y las nuevas oportunidades que lo envuelven en la movilidad eléctrica como solución frente a variadas categorías vehiculares que requieren de tecnologías más efectivas en su camino a la descarbonización. Para ello, se registró el parque actual y proyecto de vehículos a hidrógeno en los países que están liderando su desarrollo, junto con la infraestructura de recarga correspondiente a su despliegue.

En segundo lugar, se examina de forma más específica la situación presente en Chile con respecto a los efectos de la crisis climática en todo su territorio y el plan de acción que está llevando a cabo para enfrentar y mitigar dichos daños, estableciendo como posible medida el uso del hidrógeno como combustible en diferentes sectores industriales, principalmente la de transporte, para entonces lograr las metas establecidas como país hacia la carbono neutralidad.

Finalmente, se describe a modo general el funcionamiento de la tecnología de movilidad eléctrica basada en celdas de combustible a hidrógeno, detallando los subsistemas que componen al vehículo y los principales elementos existentes en la mayoría de las categorías de transporte terrestre por carretera.

1.1. Contexto internacional

El hidrógeno se ha utilizado en distintos sectores industriales a nivel mundial desde hace varias décadas, por un lado, como combustible para aplicaciones aeroespaciales donde tuvo gran protagonismo en los años 60's, refinería para producción de petróleo, metanol, amoníaco, entre otros [5]. Por otro lado, en el área de transportes fue el año 1966 cuando se creó el primer vehículo de carretera que utilizaba celdas de combustible, el GM Electrovan de Chevrolet [6] que empleaba hidrógeno y oxígeno líquido almacenados en su interior para su propulsión fue considerado como uno de los vehículos más modernos de la época.

Con el paso de los años estas aplicaciones han evolucionado y el transporte basado en hidrógeno se ha posicionado cada vez más como una potencial alternativa a los combustibles fósiles, causantes en gran medida de la contaminación ambiental que tiene hoy al planeta en una crisis climática de consecuencias catastróficas. La movilidad eléctrica con hidrógeno no solo posee beneficios medioambientales al no emitir gases tóxicos a la atmósfera durante su funcionamiento, sino que además se caracteriza por tener una elevada densidad energética por unidad másica de 120 [MJ/kg], casi tres veces más que la gasolina con 44 [MJ/kg] [7]. Esto permite que los vehículos de celdas de combustible cuenten con autonomías iguales o superiores a las que actualmente presta el transporte propulsado por la combustión de gasolina o diésel, junto con otras ventajas que se revisan en las próximas secciones.

Los países que lideran el desarrollo de la movilidad eléctrica mediante el uso de celdas de combustible son principalmente Japón, China, Corea del Sur, Estados Unidos (California), Alemania, Reino Unido, los cuales han anunciado una estrategia nacional y una hoja de ruta con respecto a la producción, almacenamiento, transporte y posteriores aplicaciones del hidrógeno en los diversos sectores industriales, y en donde además nacen los fabricantes más relevantes en materia de tecnología vehicular y en específico pilas de combustible tales como Ballard Power Systems, Hydrogenics, ITM Power, Plug Power, Nel Hydrogen, entre otros.

Como es posible apreciar en la **Figura 2** la categoría vehicular con mayor despliegue en el mundo hasta los años 2018-2020 corresponde a la de automóviles livianos de transporte personal, seguido de vehículos montacargas y buses de transporte público. Con respecto a la proyección al año 2030, en la **Figura 3** se aprecia que los automóviles livianos seguirán siendo los que lideren el despliegue, sin embargo, gracias a las cualidades técnicas que brinda esta tecnología, ya sea en términos de autonomía, tiempos de carga, beneficio medio ambiental y eficiencia energética, se espera que las categorías vehiculares de transporte pesado y/o larga distancia adopten el uso del hidrógeno como principal fuente de propulsión ya que en miras de una descarbonización del sector esta sería la única alternativa viable en comparación con las baterías de litio.

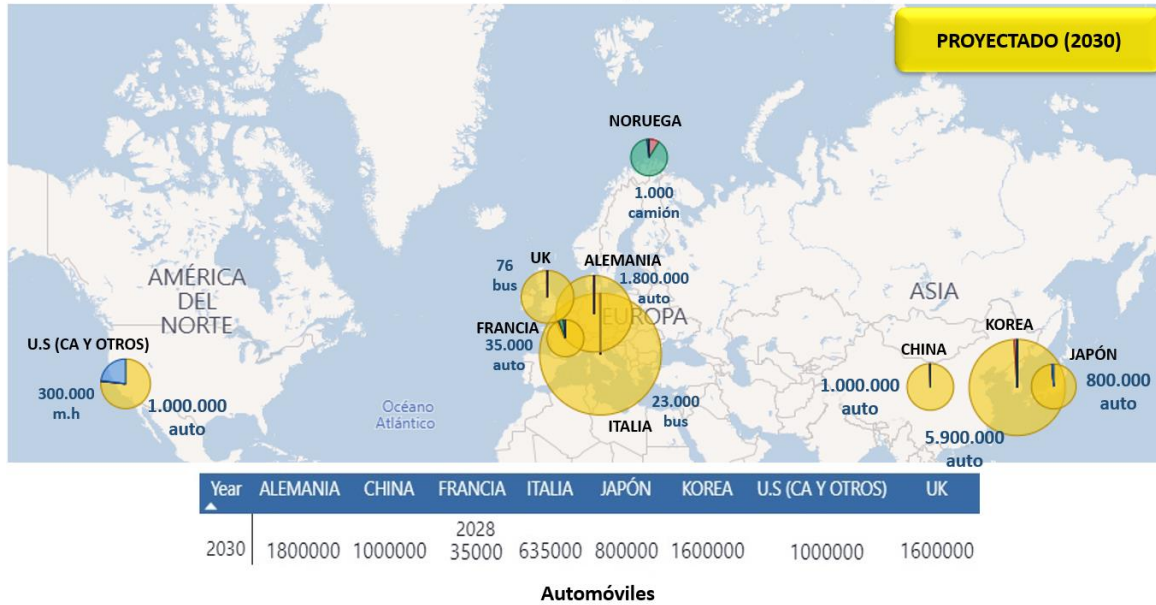
Figura 2: Mapa mundial del parque vehicular en la actualidad, considerando un rango de años entre 2018-2020.



Fuente: Elaboración propia. [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15]

Figura 3: Mapa mundial del parque vehicular en proyección, considerando el desarrollo hasta el año 2030.

Uso ● Automóvil ● Bus ● Camiones ● Estación de recarga ● Material handling



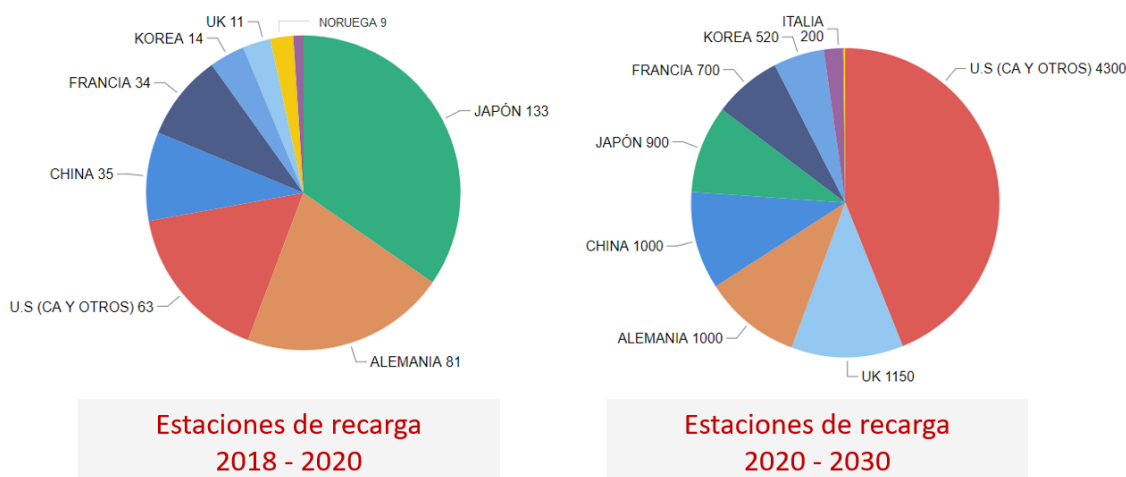
Fuente: Elaboración propia. [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15]

“Se estima que el mercado de celdas de combustible automotriz será de 13.6 mil unidades en 2020 y se proyecta que alcance las 932.6 mil unidades en 2028, a una tasa compuesta anual de 69.7%.” [16]

Junto con el aumento de la movilidad eléctrica mediante celdas de combustible en todo el mundo, es necesario que aumente también el despliegue de una adecuada infraestructura de recarga que pueda abastecer dicho transporte. Es por esto que se puede apreciar en la

Figura 4 el gran incremento que se presenta en estaciones de carga en los principales países en esta tecnología para los intervalos de año 2018-2020 a 2020-2030, donde se observa que Estados Unidos (California), China, Reino Unido, Alemania y Japón siguen siendo los líderes en el desarrollo de esta materia.

Figura 4: Distribución actual y proyectada de las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno a nivel mundial



Fuente: Elaboración propia. [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15]

En general, se espera un crecimiento significativo en el interés del uso de celdas de combustible como fuente de potencia para todas las categorías vehiculares de transporte terrestre, en especial para automóviles livianos de uso personal, aunque sin duda será una tecnología protagonista en la descarbonización del transporte de alto tonelaje y largo recorrido. Este desarrollo implicará necesariamente un aumento de la infraestructura de recarga disponible en el mundo para abastecer el parque vehicular venidero.

1.2. Estado actual en Chile y oportunidades para el desarrollo

Al igual que el resto de los países del mundo Chile está presenciando los efectos catastróficos de la crisis climática, evidenciados en sequías extremas que afectan a gran parte de la zona centro y sur del territorio nacional, el incremento de incendios forestales, inundaciones, deslizamientos de tierra e impactos negativos en la flora y fauna terrestre y marina. [17]

Además, en el último estudio realizado por la Universidad de Yale y Columbia en el año 2018 en el que se evalúa el desempeño ambiental que han tenido los países en materia de cambio climático, Chile fue situado en el puesto 84 de 180 países totales a nivel general internacional, y puesto 11 a nivel latinoamericano. Por un lado, obtuvo la peor calificación en el área de contaminación del aire ubicándose en el puesto 176, donde los indicadores principales se basan en la intensidad de emisiones de gases óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO₂), mientras que en cuanto a registro de emisiones de material particulado PM_{2,5} fue evaluado en el lugar 85 [18].

Lo anterior ha hecho necesario que se impulsen acciones y medidas concretas para mitigar los efectos medio ambientales antes mencionados. Dentro de las propuestas que se han establecido en el marco de políticas públicas, el Ministerio de Energía de Chile lanzó un plan detallado en el libro “Energía 2050” en el que se proyecta que para dicho año se tendrá una matriz energética con al menos un 70% de energías renovables, de las cuales eólica y solar serán las principales fuentes a utilizar [19]. Junto con ello, luego de la vigésimo primera reunión de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) se logró el Acuerdo de París, en el que se propone, entre otras cosas, mantener la temperatura media mundial por debajo de los 2 [°C].

Para poder alcanzar las metas planteadas en dichos acuerdos y políticas públicas, el país se propuso ser carbono neutrales para el año 2050, además de contar con un transporte público eléctrico en su totalidad para el año 2040 [20]. Es aquí donde las diferentes tecnologías que se enmarcan en la electromovilidad cumplen un rol de suma importancia para contribuir con la transición energética hacia la carbono neutralidad, donde el hidrógeno podría ser el complemento para las baterías de litio que ya están en funcionamiento en múltiples categorías vehiculares, incluyendo los buses de transporte público de la capital.

Si bien el hidrógeno no es algo nuevo para Chile, hasta la fecha se ha utilizado en su mayoría para procesos de refinación de combustibles como gasolina, kerosene y diésel, además de que el hidrógeno empleado en estos casos proviene de procesos de reformado de gas metano, y no de fuentes renovables limpias.

A pesar del manejo y producción que ha tenido este gas en el país, desde el Ministerio de Energía ya han surgido iniciativas que pretenden posicionar al hidrógeno, producido en base a fuentes de energía limpia, como un vector energético importante en la matriz generadora de Chile. Es así como ya fue publicada la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, documento desarrollado por dicho ministerio junto con la participación del sector público, privado y distintos expertos, en donde se detalla la hoja de ruta a seguir para convertir a Chile en uno de los principales exportadores del combustible a nivel internacional, que por lo demás cumplirá un rol fundamental en la transición energética para alcanzar la meta nacional antes mencionada.

Chile tiene una gran oportunidad de ser uno de los mayores productores de hidrógeno verde a nivel mundial, esto porque tiene un potencial en energías renovables no convencionales único en el mundo, la energía solar y eólica podrían ser la fuente principal para la producción de hidrógeno, pudiendo establecer una economía basada en hidrógeno verde [21]. El potencial es tal que sería posible abastecer al territorio nacional y además exportar hacia otros países que no tienen la posibilidad de generar por sus propios medios este combustible, a costos relativamente bajos y competitivos con respecto a los demás combustibles llegando a US\$1 por kilogramo [22].

Ser productores de hidrógeno verde no solo conlleva un beneficio de prestigio en todo el mundo, sino que también se asocia a una estabilidad y seguridad económica puesto que el país es muy vulnerable ante los cambios de economía a nivel internacional al depender casi en su totalidad a la extracción de materias primas y a exportación de productos agrícolas y ganaderos. De esta forma la economía local podría pasar a ser una de bienes y servicios, contando con precios estables en transporte y electricidad. Asimismo, sería una oportunidad para la creación de nuevos empleos que requieran mayor especialización del capital humano en estas áreas tecnológicas.

Por último, introducir al hidrógeno verde en la matriz energética local podría contribuir a la mitigación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y por consecuencia a la descontaminación de las ciudades.

1.3. Tecnología de celdas de combustible aplicada a transporte terrestre

En el Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático publicado en el año 2018 se informa que durante el año 2016 el sector que generó más emisiones de GEI fue el de energía con un 78,7%, dentro del cual destacó en primer lugar “industrias de la energía” con un 41,5% del total y en segundo lugar se ubicó al sector transporte con un 31,3% del total emitido [23].

La movilidad eléctrica es clave para contribuir con la transición energética y para descarbonizar el sector de transporte que se ha basado casi en su totalidad en combustibles fósiles como diésel y gasolina, es así como es necesario incluir tecnologías de electromovilidad al parque vehicular de Chile y el mundo. Por un lado, están las baterías de litio como fuente principal de almacenamiento energético para la propulsión del motor, y por otro lado se encuentran las celdas de combustible que utilizan hidrógeno gaseoso para generar electricidad posteriormente suministrada al motor de los vehículos.

Si bien las baterías llevan más tiempo en el mercado local y mundial, no ha sido suficiente su uso para todas las aplicaciones automotrices, esto debido a que la capacidad energética que éstas pueden suministrar no abarca el consumo eléctrico requerido por ciertas categorías vehiculares que transportan más peso y/o que recorren distancias más largas. De igual forma, cuentan con otras características técnicas que impiden la recarga eléctrica en menos de 3-4 horas, dependiendo del tipo de vehículo y cargador en cuestión. Por ello, el hidrógeno y las celdas de combustible cumplen un rol complementario fundamental para alcanzar la descarbonización del transporte en todas sus áreas, ya que este gas combustible posee una gran densidad energética por unidad de masa, es posible transportarlo en grandes cantidades por su bajo peso, y además tarda la misma cantidad de tiempo en recargar el tanque de combustible que lo que demoran actualmente los vehículos que emplean diésel o gasolina.

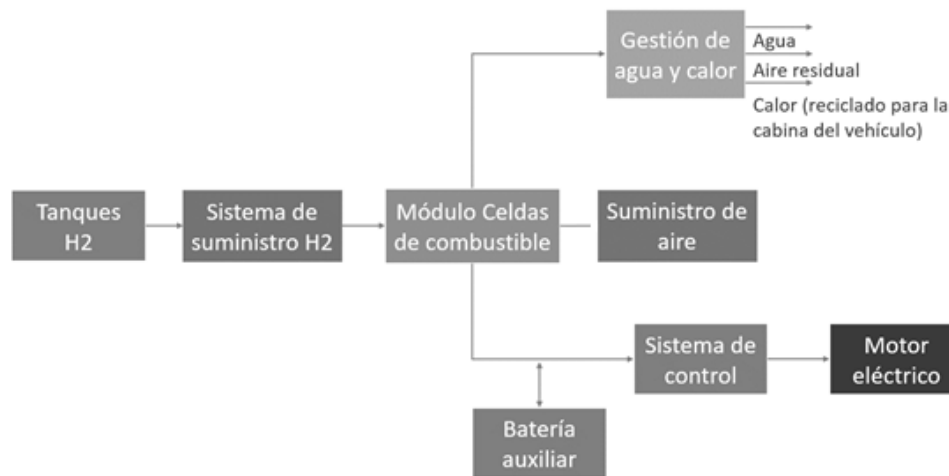
1.3.1. Principio de funcionamiento

La tecnología del hidrógeno en la electromovilidad consiste básicamente en un sistema de propulsión eléctrica abastecido por electricidad producida a bordo, mediante un proceso electroquímico entre el hidrógeno gaseoso almacenado en sí mismo, y aire extraído desde el ambiente, teniendo lugar en el dispositivo central llamado celda de combustible.

Existen diferentes tipos de celdas, sin embargo, la que se utiliza para aplicaciones vehiculares corresponde a la celda de membrana de intercambio protónico (PEM por sus siglas en inglés). En ésta ocurre una combinación entre los átomos del hidrógeno y del oxígeno gracias a la presencia de la membrana intercambiadora de protones, lo cual genera como producto final electricidad, calor y agua.

En la **Figura 5** se pueden observar las principales etapas y/o módulos que se encuentran dentro de un vehículo de celdas de combustible (FCEV por sus siglas en inglés), y el recorrido que realizan los flujos energéticos. Aquí se puede apreciar que el módulo de celdas de combustible es el dispositivo central de todo el sistema, a partir del cual se produce la energía necesaria para el abastecimiento del vehículo.

Figura 5: Esquema resumen del principio de funcionamiento de un FCEV.



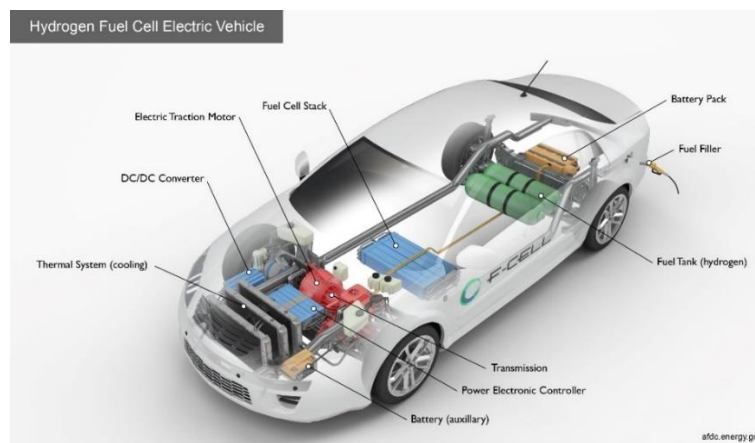
Fuente: Elaboración propia en base al reporte de Deloitte y Ballard. [11]

1.3.2. Principales módulos dentro del vehículo

Tal como se revisó en la sección 1.1 las categorías vehiculares más comunes en transporte por carretera con uso de celdas de combustible son los automóviles livianos, buses, camiones y montacargas. A pesar de que la morfología es bastante diferente para cada uno de estos, tienen en común los siguientes módulos y/o subsistemas que son necesarios para poder propulsarse mediante la electricidad y las celdas de combustible, en la

Figura 6 se muestra un ejemplo para el automóvil liviano.

Figura 6: Diagrama descriptivo de la composición de un FCEV.



Fuente: Sitio web de U.S Department of Energy. [24]

A continuación, se describen en términos generales los principales componentes dentro de un vehículo de celdas de combustible, posteriormente en el **Capítulo 3: Análisis técnico del uso de la tecnología en buses urbanos de transporte público** se revisará en mayor profundidad el sistema dentro de un bus de transporte público.

Sistema de propulsión

La fuente de energía primaria en los FCEV corresponde al módulo de celdas de combustible, capaces de producir electricidad a partir de hidrógeno gaseoso y el oxígeno proveniente del aire ambiental. En caso de que el requerimiento energético sea más elevado que lo que puede suministrar el módulo de celdas de combustible, se recurre a la fuente de energía secundaria correspondiente al pack de baterías de litio que transporta el vehículo.

- **Almacenamiento de hidrógeno**

Para aplicaciones de movilidad terrestre por carretera el hidrógeno se almacena a bordo del vehículo de forma gaseosa en tanques de materiales especiales, que cumplen la función de reservar este gas combustible de manera segura, y en condiciones de presión adecuadas.

Dependiendo de la categoría vehicular en cuestión será necesario el almacenamiento del hidrógeno a 350 o 700 [bar], por lo que los tanques empleados para su almacenamiento deben ser del tipo III o IV. El primero corresponde a contenedores hechos en base a metal con recubrimiento de fibra de carbono, mientras que el segundo posee materiales no-metálicos con revestimiento de polímero y fibra de carbono [25]. Como ejemplo de lo anterior, se presenta en la **Figura 7** el tanque de almacenamiento que posee uno de los vehículos más vendidos de celdas de combustible, el Toyota Mirai, el cual requiere la reserva de hidrógeno a una presión de 700 [bar] y utiliza un tanque tipo IV.

Figura 7: Contenedor de hidrógeno gaseoso utilizado en el vehículo Toyota Mirai, correspondiente a cilindro tipo IV.



Fuente: Toyota.

- Celdas de combustible

El tipo de celda empleada para aplicaciones de transporte terrestre es la de tipo PEM, a la cual ingresa hidrógeno gaseoso y oxígeno desde el aire exterior que posteriormente se combinan mediante la permeabilidad de la membrana intercambiadora de protones a los iones de hidrógeno, permitiendo el flujo de estos desde el ánodo hacia el cátodo. En este último componente los protones del hidrógeno se combinan con los del oxígeno y dan paso a la formación de agua hacia el exterior. Por el contrario, los electrones de este combustible no pueden traspasar la membrana y se ven obligados a circular por un camino alternativo a través del ánodo y hacia un circuito eléctrico que, producto del flujo de estos átomos, finalmente logran la generación de electricidad y calor.

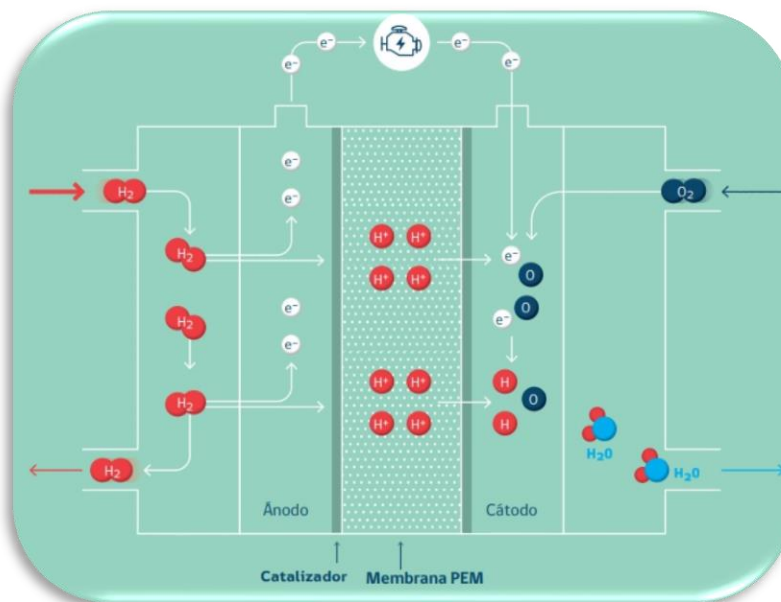
El proceso recién descrito se puede esquematizar y resumir en la

Figura 8, en donde además se aprecian los principales componentes de este dispositivo, membrana intercambiadora de protones, catalizador, ánodo y cátodo.

Por un lado, la membrana central de la celda corresponde al electrolito, que gracias a sus propiedades físicas es permeable solo a los protones y bloquea el paso de los electrones del combustible.

Por otro lado, el catalizador consiste en una capa compuesta por nano partículas de platino que rodean al electrolito de la celda y logra separar los átomos del hidrógeno en electrones y protones, y los conduce hacia sus caminos correspondientes. A un lado del catalizador está el ánodo, placa por la cual circulan los electrones del hidrógeno, y al otro lado se encuentra el cátodo, placa por la que fluyen los átomos del oxígeno y los electrones del hidrógeno luego de recorrer el circuito eléctrico, formando agua y calor.

Figura 8: Esquema de una celda de combustible tipo PEM.



Fuente: Plataforma de electromovilidad, Ministerio de Energía de Chile [26].

Es fundamental aclarar que dentro de la celda de combustible no se genera una combustión, sino que una transformación electroquímica de los gases reactantes mediante la combinación de sus átomos, como se explicó en párrafos anteriores. Para que el proceso se desarrolle de forma óptima, es necesario que se cumplan ciertas condiciones dentro del dispositivo, las cuales se detallan de manera clara en la **Tabla 1**.

Dentro de las condiciones adecuadas está el grado de humedad de la membrana intercambiadora de protones, esto es fundamental para que mejore la conductividad iónica y se pueda efectuar de manera correcta el proceso. Para ello se requiere que los gases reactantes sean humidificados previo a ingresar a la celda, en una proporción estequiométrica descrita en la misma tabla.

Junto con ello, los niveles de presión y temperatura dentro de la celda son primordiales para asegurar la realización del proceso y proteger al dispositivo de daños, alargando así su vida útil. Por esta razón, existen elementos tales como válvulas reguladoras de caudal y presión que se encargan de dirigir todos los flujos entrantes a la celda en las proporciones óptimas.

Tabla 1: Condiciones óptimas de presión, temperatura, humedad y proporción de gases reactantes para la celda de combustible tipo PEM

Condición	Valor óptimo
Temperatura	60 - 80 [°C]
Presión	3,2 [bar]
Humedad H_2	100%
Humedad O_2 – aire	100%
Proporción H_2	1 a 1,2 <i>Estequiométrico</i>
Proporción O_2	1,2 a 1,5 <i>Estequiométrico</i>
Proporción aire	2 a 2,5 <i>Estequiométrico</i>

Fuente: Barbir, F. (2013) [27]

- Dispositivos eléctricos

Los principales componentes eléctricos que se encuentran en un FCEV corresponden al motor eléctrico, el pack de baterías auxiliares, el convertidor y el inversor de corriente, los cuales se ejemplifican en la

Figura 9.

En primer lugar, el pack de baterías cumple el rol de almacenamiento secundario de energía que se utiliza solo en casos en que la solicitud eléctrica sea mayor a la capacidad de producción de la celda de combustible, siendo un complemento a esta.

En segundo lugar, el conversor y el inversor cumplen la función de regular la intensidad de la corriente y convertirla a alterna a continua según la dirección de la energía, ya sea para alimentar al pack de baterías desde la celda de combustible o desde la celda y batería hacia el motor eléctrico del vehículo.

Por último, el encargado de propulsar y lograr la tracción del FCEV es el motor eléctrico, el cual es alimentado principalmente por la energía proveniente de la celda y en ocasiones por el pack de baterías auxiliar.

Figura 9: Inversor y motor eléctrico ELFA, y batería eléctrica, utilizados comúnmente en los FCEV.



Fuente: Siemens y Nissan.

Manejo de calor

Todo tipo de FCEV requiere de un sistema que maneje el calor residual de los procesos internos de generación eléctrica y por el funcionamiento de los diferentes componentes que forman parte de él. Hay dos posibilidades para gestionar y direccionar el calor excedente, por un lado, puede aprovecharse en otros procesos internos como es el caso de la humidificación de los gases reactivos que ingresan a la celda de combustible o para la calefacción de la cabina de pasajeros. Por otro lado, si no se necesita esa energía calórica esta es expulsada hacia la atmósfera.

Para llevar a cabo el enfriamiento de los elementos y los procesos del vehículo, se utiliza un líquido refrigerante que se compone en un 50% de agua desionizada y otro 50% de etileno puro. Éste fluye por los diferentes circuitos que conectan los subsistemas y con ello absorbe y/o expulsa calor de los canales.

Sistema HVAC

El sistema HVAC (por sus siglas en inglés) corresponde a la unidad de aire acondicionado, calefacción y ventilación. Su función consiste en suministrar calor a la cabina de pasajeros en caso de solicitarlo, pero primordialmente se encarga de mantener ventiladas todas las zonas internas de los procesos de generación energética. Lo anterior con el fin de evitar posibles confinamientos de hidrógeno y oxígeno que eventualmente podrían dar paso a la formación de atmósferas inflamables y explosivas, para ello se extrae aire desde el exterior y se hace circular por las unidades del vehículo, teniendo especial cuidado en la zona de almacenamiento de combustible y en el módulo de celdas de combustible.

Sistema electrónico y de control

Este módulo cumple el rol de supervisar y asegurar el correcto funcionamiento de los dispositivos eléctricos, suministrando la energía que cada uno de estos requiera desde las celdas de combustible y baterías. Asimismo, se encarga de monitorear los sensores de seguridad que se posicionan en puntos específicos en el sistema general del vehículo, por ejemplo, en los tanques de almacenamiento, en el módulo de celdas y en el motor eléctrico. Por último, gestionan las funciones estándares de un FCEV, como el encendido de luces, activación de calefacción y aire acondicionado.

Los métodos de seguridad se abordarán con mayor profundidad en el **Capítulo 3: Análisis técnico del uso de la tecnología en buses urbanos de transporte público**

En base a la revisión efectuada en la sección queda en evidencia que el hidrógeno posee un gran potencial como vector energético en el transporte terrestre, y es capaz de suplantar a combustibles fósiles con el beneficio de no emitir ninguna emisión contaminante al ambiente además de agua y calor. El interés por sus cualidades técnicas y medio ambientales se ha incrementado en los últimos años dado el contexto climático que tiene en peligro la supervivencia del ecosistema natural de la Tierra, y se espera un futuro prometedor para la industria del hidrógeno a nivel internacional y local, siendo una de las tecnologías protagonistas en la transición energética hacia la descarbonización.

Capítulo 2: Metodología

A lo largo de este capítulo se detalla el marco metodológico escogido para llevar a cabo el objetivo general del trabajo de estudiar y analizar la factibilidad técnica del uso de celdas de combustible a hidrógeno como fuente de potencia en el transporte terrestre nacional.

Para ello, en primera instancia, se presenta un diagrama de flujo que describe de manera general las etapas del proceso analítico y las métricas utilizadas para la obtención de los resultados. Posteriormente se hace una revisión con mayor profundidad de cada uno de los parámetros técnicos que se establecieron para lograr los objetivos específicos planteados en la investigación.

2.1. Descripción general

El desarrollo general del estudio se basó en la revisión y el estudio bibliográfico de la tecnología del hidrógeno, la teoría de su funcionamiento y la experiencia internacional de su aplicación y evolución en la industria.

En la **Figura 10** se presenta el diagrama que describe a modo general las entradas y las salidas del análisis establecidas para alcanzar los resultados finales, tomando como eje central la aplicación de celdas de combustible a hidrógeno (HFC sus siglas en inglés) al transporte terrestre, el cual surge luego de un trabajo investigativo completo de la tecnología a nivel mundial.

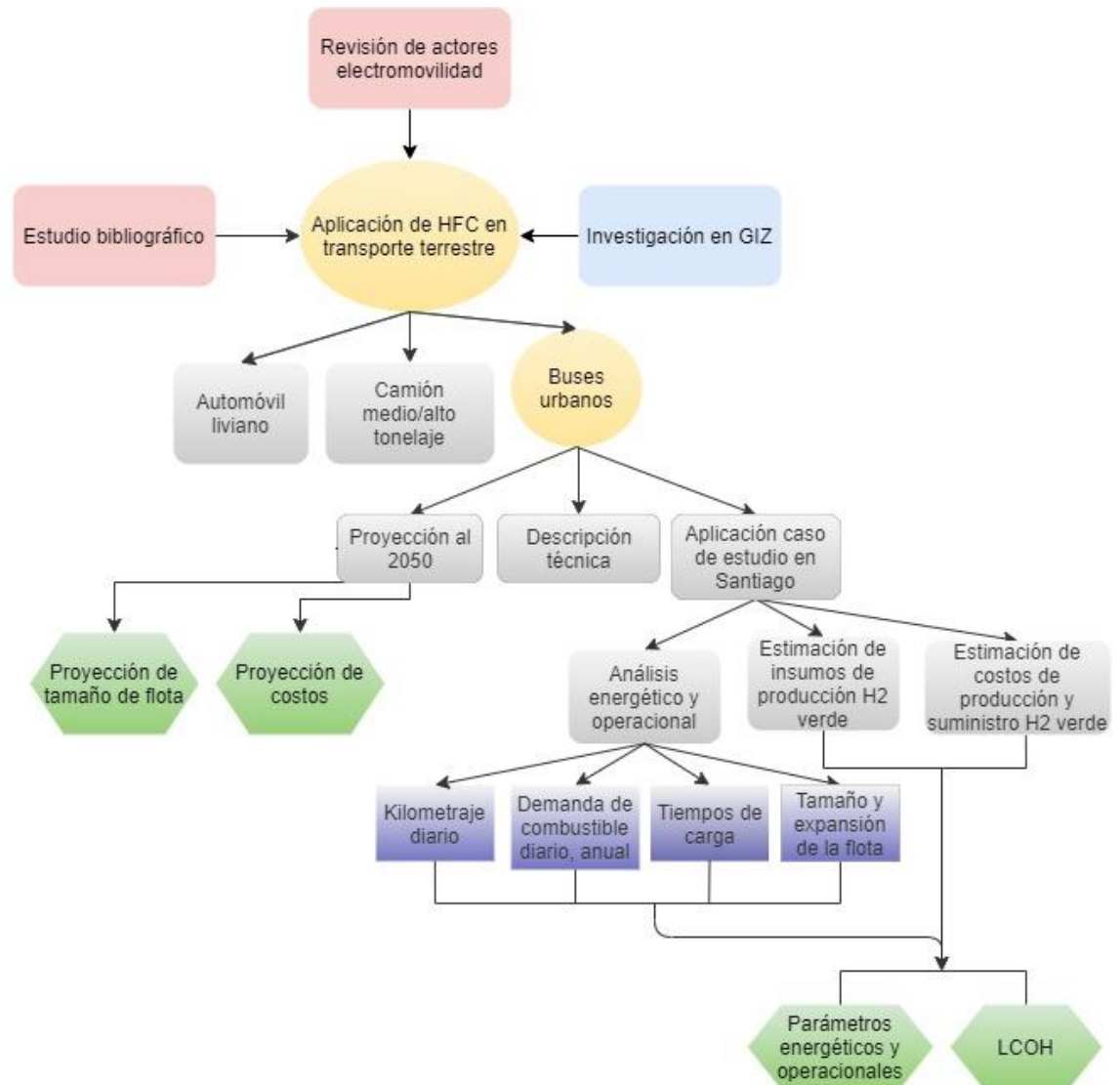
Posterior a la elección de estudio de las aplicaciones del uso de hidrógeno en el transporte terrestre, y considerando el análisis de actores locales de electromovilidad en conjunto con las oportunidades de implementar las celdas de combustible en Chile, el estudio se enfoca en la categoría vehicular específica de buses urbanos para uso en el servicio público de las ciudades.

En este aspecto se realizó un análisis completo de funcionamiento de estos vehículos, sus especificaciones y características técnicas y el potencial beneficio que implica su uso en reemplazo de los buses convencionales basados en la potencia de combustibles fósiles.

En virtud de lo anterior se realizó un estudio de caso para la ciudad de Santiago en el que se simuló la entrada de una flota de FCEB al sistema de transporte público, como homologación a la actual flota de BEB que está circulando en la capital, con un crecimiento paulatino hasta alcanzar un total de 400 vehículos. Para esto, se efectuó un cálculo energético y se obtuvieron diferentes métricas, tales como kilometraje diario de los vehículos, demanda de combustible diaria y anual por cada bus y por la flota completa, los insumos necesarios para la producción de hidrógeno verde que alimentaría a los buses, y por último una estimación de los costos asociados a la cadena de valor implicada en el despliegue y operación del servicio.

Paralelamente se realizó una proyección del desarrollo de los FCEB en Chile hasta el año 2050, obteniendo como resultado final un tamaño de flota estimado para dicho año, el suministro de combustible requerido para ello y un diagnóstico de costos relacionado a la producción del hidrógeno verde en Chile para proyectos de la misma índole.

Figura 10: Diagrama de la metodología implementada en el trabajo de investigación.



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Estudio bibliográfico e investigación en GIZ

Tal como se mencionó previamente, el trabajo se basó primordialmente en una revisión bibliográfica de las principales fuentes de información internacional de movilidad eléctrica, celdas de combustible a hidrógeno, y nuevas tecnologías para mejoras medio ambientales. Esto ya que a nivel nacional el uso de hidrógeno como vector energético es una opción nueva y no se posee experiencia previa en dicho aspecto.

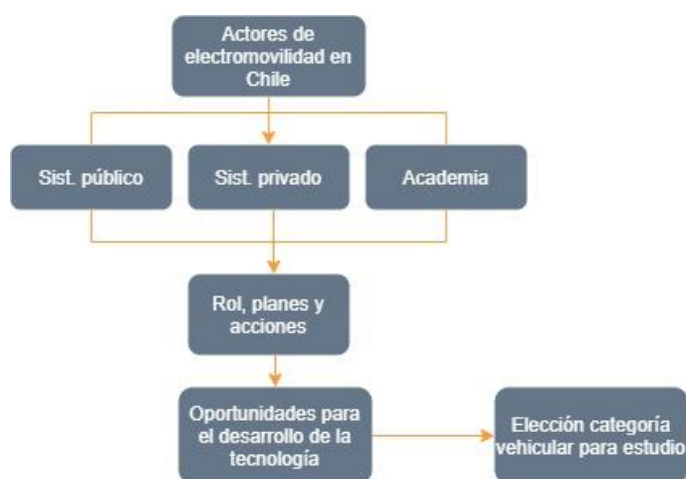
Adicionalmente, cabe destacar el estudio de investigación que se realizó en la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ) dentro del Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética, en donde fue posible desarrollar un documento [4] de manera paralela que aborda en profundidad la tecnología de celdas de combustible aplicada a los buses urbanos. Este reporte comparte varias secciones con este trabajo de memoria, y será publicado durante el año 2021.

2.3. Identificación de actores para el uso de hidrógeno en Chile

El análisis de actores de la electromovilidad en el país contextualiza el estado en el que se encuentra la tecnología y las oportunidades de desarrollo a corto y largo plazo. Por esto, primero se identificaron las principales instituciones, entidades y agrupaciones que participan activamente y cumplen distintos roles en la sociedad para impulsar el transporte eléctrico en Chile (véase **Figura 11**).

Luego, se estudiaron las potenciales categorías vehiculares de transporte terrestre vial que pudiesen ser candidatos para la implementación de HFC como fuente de potencia principal en el mediano y/o largo plazo en el país.

Figura 11: Diagrama metodológico utilizado en el análisis de actores a nivel nacional de electromovilidad y uso de hidrógeno en el transporte terrestre.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Instituciones y agrupaciones líderes en electromovilidad a nivel nacional

Para el análisis de los actores se clasificó a cada una de las entidades según el sector desde cual aportan al desarrollo e impulso de la electromovilidad a la ciudadanía, éstos son, sector público, sector privado y la academia. Teniendo establecidos estos roles se indagó en las principales acciones, medidas y planes que contemplan hoy en día y las ambiciones futuras para promover la descarbonización de la matriz y la mitigación de emisiones tóxicas a través de la movilidad eléctrica.

2.3.2. Potenciales categorías vehiculares para el análisis

Las categorías vehiculares de transporte terrestre que se seleccionaron como candidatas para la aplicación de HFC fueron:

- Automóviles personales livianos
- Buses urbanos para servicio público
- Camiones interurbanos de carga media o alta

Si bien es posible utilizar las celdas de combustibles en las tres categorías mencionadas, se optó por realizar el análisis en los buses de transporte público para la ciudad de Santiago en base a las oportunidades identificadas en los planes de los actores locales de la electromovilidad.

Por un lado, ya existen estudios en marcha para la aplicación de HFC en camiones dentro del territorio nacional a diferencia del caso para buses urbanos que no se ha considerado hasta el momento. Por otro lado, desde el gobierno de Chile se han anunciado metas en el marco de la descarbonización del sector que contemplan la electrificación completa de la flota de buses de la Red Metropolitana de Movilidad, por lo que los FCEB serían el potencial complemento a los BEB que ya están circulando por las calles de Santiago y que podrían presentar limitaciones relacionada a su autonomía y tiempos de carga.

2.4. Descripción técnica de FCEB

La descripción técnica de los buses implicó una revisión completa de los principales módulos, dispositivos y elementos dentro del vehículo, involucrados en el funcionamiento, sistema de propulsión, de enfriamiento y HVAC. Junto con ello, se estudió la infraestructura requerida para el reabastecimiento energético y la correcta operación de la flota. Finalmente se investigaron los riesgos asociados al uso, manejo y almacenamiento del hidrógeno, con ello los métodos de seguridad implementados tanto en los vehículos como en las estaciones de repostaje.

Con esta información se pudieron obtener datos de la capacidad técnica de los buses, tales como autonomía, consumo de combustible, almacenamiento interno disponible, energía equivalente transportada a bordo y tiempos de carga.

Para lograr lo anterior, se examinaron reportes y sitios web oficiales de universidades, agencias energéticas y centros de información especializados en el sector de la energía y sus aplicaciones finales. Entre las principales fuentes revisadas, las más destacadas son la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), Hydrogen Council, Deloitte, el Departamento de Energía de Estados Unidos, entre otros.

2.5. Aplicación Caso de estudio en Santiago

Para llevar a cabo la aplicación de la tecnología de HFC en buses a un caso real de estudio en la ciudad de Santiago, se simuló la entrada paulatina de una flota de FCEBs a la Red Metropolitana de Movilidad (RED) de la capital en un plazo total de 5 años con dos grandes períodos de expansión a baja y gran escala.

El análisis se basó en tres pilares principales, en primer lugar, un cálculo energético asociado a la operación diaria de la flota, en segundo lugar, una estimación de los insumos necesarios para la producción del combustible en el mismo terminal de buses y, por último, una estimación de los costos implicados en la producción, almacenamiento, compresión y dispensación del hidrógeno en el depósito de aparcamiento. Todos estos puntos dieron como resultado los parámetros energéticos de la flota completa de buses en todos sus periodos de expansión y un costo nivelado del combustible considerando la propia producción de este.

Lo anterior se basó en una revisión bibliográfica de proyectos internacionales similares, como el de New Bus Fuel financiado por Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, y en entrevistas a expertos.

2.5.1. Cálculo energético y operacional

Para el cálculo energético, en primera instancia, se hizo una recopilación de información acerca de la logística operacional de los buses que actualmente son parte de RED, para lo cual fue necesaria la entrevista al experto Rodrigo Tapia, ex profesional del Directorio de Transporte Público Metropolitano (DPTM), quien brindó datos específicos acerca del funcionamiento de la flota actual de BEB en el sistema de transporte público con el fin de tener una referencia. Junto con ello, se revisó el portal web oficial de RED y se extrajo la información referente a ciertas líneas de recorridos que están siendo operados por buses eléctricos, y el kilometraje de cada tramo.

Teniendo el análisis operacional, se estimó el kilometraje promedio entre el recorrido más corto y el más largo, a partir del cual se calculó la distancia diaria recorrida por cada bus y por la flota completa.

Posterior a esto, se tomaron como referencia unos modelos específicos de buses urbanos basados en HFC, éstos son Xcelsior Charge H2, New Flyer, y Solaris Urbino 12H, ya que se han utilizado en proyectos internacionales enfocados en la misma área, el transporte público de las ciudades. Los tres corresponden a buses de solo 1 piso, con 12 [m] de longitud, y sus especificaciones técnicas en detalle se presentan en la **Tabla 2**. Con ello se pudo promediar un consumo de combustible por kilómetro

recorrido y la energía equivalente, obteniendo así la demanda diaria de hidrógeno gaseoso por cada bus y por la flota completa.

Además, con la información del tiempo de carga de cada bus se calculó el tiempo estimado para el reabastecimiento de la flota completa, considerado desde el posicionamiento del bus en el surtidor del combustible hasta la carga completa de su almacenamiento interno.

2.5.2. Estimación de costos e insumos de producción de combustible

Con respecto a la demanda de insumos requeridos para la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua, en el mismo terminal de buses, se calculó el consumo de electricidad y agua requeridos para la producción del combustible tomando como base la demanda diaria y anual por la flota completa de buses en ambas etapas de expansión.

En cuanto consumo eléctrico, se consideró lo requerido por parte de los principales dispositivos involucrados en la elaboración y suministro del hidrógeno, siendo este el insumo predominante en el proceso, mientras que el agua consumida corresponde a una proporción menor.

Finalmente, mediante correos electrónicos se resolvieron dudas y se solicitó ayuda a Juan Pablo Zuñiga, director ejecutivo de la Asociación Chilena de Hidrógeno (H2 Chile) sobre los cálculos de costos que se involucran en el proceso de producción y suministro de combustible. Por tanto, con todos los parámetros energéticos, operacionales y la demanda de insumos pertinente, se calculó un costo nivelado del hidrógeno (LCOH por sus siglas en inglés) que considera los costos aguas debajo de la cadena de valor de producción, tales como, sistemas de almacenamiento, compresión, acondicionamiento y dispensación. Para ello se empleó la siguiente expresión matemática

$$(1) \quad LCOH = \frac{C_{LCC,a}}{E_{H_2,a}} \left[\text{€/kg } H_2 \right]$$

Donde:

$C_{inv} = C_{WE} + C_C + C_S + C_D$	Costo de inversión de los equipos
$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$	Factor de recuperación
$C_{inv,a} = CRF \cdot C_{inv}$	Costo de inversión anualizado
$C_{fOM,a} = C_{mwe} + C_{mc} + C_{ms} + C_{md} + C_{cs} + C_{rempe,a}$	Costos fijos de operación, anual
$C_{vOM,a} = C_e + C_w$	Costos variables de operación, anual
$C_{LCC,a} = C_{inv,a} + C_{fOM,a} + C_{vOM,a}$	Costo del ciclo de vida, anual

C_{WE} : Costo inversión del electrolizador
 C_C : Costo inversión del compresor
 C_S : Costo inversión del sistema de almacenamiento
 $E_{H2,a}$: Producción anual de combustible
 C_D : Costo inversión del dispensador
 i : tasa de descuento
 n : duración del proyecto [años]

C_{mwe} : costos de mantención electrolizador
 C_{mc} : costos de mantención compresor
 C_{ms} : costos de mantención almacenamiento
 C_{md} : costos de mantención dispensador
 $C_{remp,a}$: Costos de reemplazo de equipos
 C_e : Costos asociados al consumo eléctrico
 C_w : Costos asociados al consumo de agua

El detalle y los supuestos correspondientes para el estudio se profundizan en el **Capítulo 2: Metodología**

2.6. Proyección al 2050

La proyección de la tecnología aplicada específicamente a la categoría de buses urbanos para uso en el transporte público hacia el año 2050 se fundamentó en dos factores principales, el tamaño de la flota y el suministro de combustible requerido para su abastecimiento, y un diagnóstico de costos de producción para dicha fecha.

2.6.1. Tamaño de flota estimado y suministro de combustible

El cálculo del número de buses para el año 2050 en el sistema de transporte público de la ciudad de Santiago, se realizó teniendo en cuenta que desde el Gobierno de Chile pretenden que desde el año 2040 el transporte público en su totalidad sea eléctrico.

En primera instancia, se estimó la cantidad de buses de transporte público que formará parte del sistema en el año 2050 asumiendo una relación directamente proporcional entre la población de Santiago y la flota de estos vehículos. Por lo cual, se tomó como referencia el número de habitantes y la cantidad de buses hasta el año 2020 y se consideró la proyección del crecimiento poblacional en la capital para 2050, realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) obteniendo entonces el tamaño de la flota de buses completo para dicho año.

Y, por último, se asumió que la flota de buses estará dividida entre buses eléctricos de batería y buses eléctricos de celdas de combustible, estimando las siguientes proporciones:

60% $\rightarrow$ BEB

40% $\rightarrow$ FCEB

Teniendo el porcentaje estimado de FCEB pertenecientes a la flota total de buses, y por ende el número de vehículos correspondientes, se procedió a calcular el combustible requerido para su abastecimiento en base al consumo diario promedio de cada uno propuesto en el **Capítulo 4: Estudio de caso para la ciudad de Santiago de Chile.**

2.6.2. Diagnóstico de costos

Dado que la tecnología en Chile aún no se ha puesto en práctica es difícil estimar el comportamiento que tendrán los costos de inversión y operación para proyectos de esta índole. Por esta razón el análisis se basó en la proyección de los costos de la energía renovable, por medio de la cual se puede producir el hidrógeno verde, y la evolución del mercado del combustible a nivel mundial y local.

La metodología se basó mayormente en el estudio y revisión bibliográfica internacional debido a la poca experiencia que aún existe en Chile acerca del uso del hidrógeno como vector energético, sobre todo en las aplicaciones finales mediante la implementación de celdas de combustible en el transporte. Sin embargo, se pudieron identificar grandes oportunidades para el desarrollo de la tecnología en el país, centradas en el reemplazo de los combustibles fósiles por fuentes de potencia eléctricas y limpias en la ciudad de Santiago.

Adicionalmente, la simulación de la entrada de una flota de FCEB al sistema de transporte público de la capital fue una herramienta interesante para determinar los parámetros técnicos necesarios para sostener un proyecto de este tipo, y los potenciales beneficios asociados a su uso como reemplazo de los actuales buses propulsados por Diésel y como complemento a los BEB.

Capítulo 3: Análisis técnico del uso de la tecnología en buses urbanos de transporte público

En el siguiente capítulo se profundiza en la tecnología de los FCEB tomando como base a dos de los modelos más utilizados en los proyectos de transporte público a nivel internacional, a partir de los cuales se hace una revisión de los principales elementos que componen su estructura y tren de propulsión, las especificaciones técnicas que poseen en general estos buses desde su capacidad de almacenamiento interno de combustible, energía equivalente transportada, tiempos de recarga del estanque, autonomía nominal y las especificaciones de ciertos dispositivos eléctricos más relevantes.

Junto con ello, se presenta la infraestructura de abastecimiento que se requiere para que estos vehículos puedan cumplir sus funciones operativas a diario de manera adecuada, mostrando las diferentes configuraciones que pueden tener las estaciones de recarga y los métodos de repostaje más utilizados.

Finalmente, se muestran los aspectos de seguridad que deben ser considerados tanto para los vehículos basados en hidrógeno como para las estaciones de reabastecimiento, con el fin de asegurar el uso confiable de este combustible para los usuarios y su entorno.

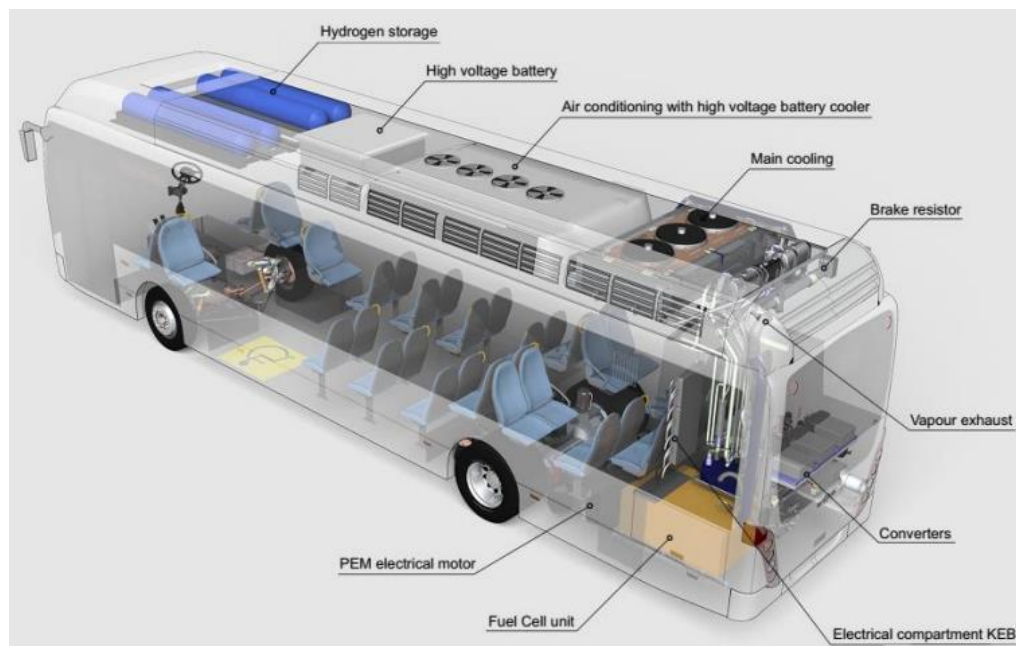
3.1. Estructura y características de un FCEB

Los módulos y componentes de un FCEB son básicamente los mismos que están presentes en las otras categorías vehiculares del tipo terrestres por carretera (Véase **Sección 1.3**), la diferencia esencial radica en el espacio disponible, la disposición espacial de los elementos y la cantidad de combustible almacenado a bordo.

El bus al contar con mayor espacio que un vehículo liviano en su estructura puede portar más contenedores de almacenamiento de hidrógeno, por esa razón cuenta con más kilogramos de combustible que le permite recorrer más kilómetros por carga. Además, se prefiere mantener la presión del gas a un nivel más bajo, 350 [bar] [11] (a diferencia de los otros vehículos que transportan el hidrógeno a 700 [bar]), de esta forma es más seguro el manejo del combustible y no se requieren dispositivos más complejos para su resguardo.

Comúnmente estos buses poseen solo 1 nivel para los pasajeros, con una longitud de 12 [m], para tradicionales (véase **Figura 12**), y 18 [m] para los articulados, aunque también es posible encontrarlos en tamaños de 10 [m] y de dos niveles. Con respecto a la distribución de los elementos en la imagen se aprecia en primer lugar que, a diferencia de los automóviles livianos, los cilindros de almacenamiento se posicionan en la parte superior del bus, ya que al transportar una mayor cantidad de hidrógeno se debe tener la precaución de mantener ventilada la zona hacia el aire exterior evitando la acumulación del gas en caso de existir fuga en los contenedores.

Figura 12: Esquema de un bus de celdas de combustible a hidrógeno



Fuente: Asociación Canadiense de Tránsito Urbano (CUTA) y Ballard. [28]

La cantidad de combustible transportado a bordo del bus dependerá del tamaño de este y el espacio disponible para el alojamiento de los cilindros, aunque por lo general para los FCEB de 12 [m] el tamaño de almacenamiento varía entre los 35 y 38 [kg]³.

Siguiendo la disposición de la imagen, se observa que atrás de los cilindros de almacenamiento se encuentra el paquete de baterías auxiliares, luego el sistema de ventilación y aire acondicionado, dispositivos eléctricos, módulo de celdas de combustible y las entradas de aire y salida de vapor. El módulo de celdas de combustible PEM se ubica por la zona inferior, cercano a los dispositivos eléctricos como convertidores, inversores y motor.

Por último, dentro del bus se ubican sensores de seguridad que registran eventuales fugas de hidrógeno o anomalías eléctricas que pudiesen ocasionar un problema [29] (estos factores de seguridad se profundizan en la **sección 3.4.3**), esta información se procesa y se informa continuamente al conductor del vehículo que se encarga de manejar de forma adecuada los procesos internos y así mantener cómodos a los usuarios del transporte público.

³ Información basada en modelos de FCEB del fabricante Solaris, Xcelsior, Wrightbus y Toyota.

3.2. Principales beneficios de la tecnología

Como ya se ha mencionado en las secciones anteriores, el transporte eléctrico basado en celdas de combustible a hidrógeno no implica ningún tipo de emisión contaminante a la atmósfera durante su operación, y en caso de que el hidrógeno utilizado sea verde, es decir, provenga de fuentes renovables limpias es una tecnología completamente limpia, siendo altamente beneficiosa para el medio ambiente y la adaptación de la sociedad hacia una descarbonización global.

Asimismo, es importante destacar que, dada la densidad energética del hidrógeno, este tipo de transporte de largo recorrido y de carga media-pesada se ve muy beneficiada en términos técnicos y operacionales, ya que brinda una autonomía superior a otras tecnologías consideradas cero emisiones como los BEB, y presentan una alta velocidad de carga.

Para demostrar lo anterior se presenta en la **Tabla 2** las especificaciones técnicas de dos FCEB usualmente usados en proyectos internacionales de servicio público, donde se destaca una autonomía de 350 – 480 [km] por carga de combustible y un tiempo de 6 – 10 [min] para la recarga completa del estanque de almacenamiento [30] [31]. Para contrastar las características de los FCEB con lo BEB se encuentra la tabla completa en el **Anexo 0**, en la cual se agregan las especificaciones técnicas del bus eléctrico que se utiliza actualmente en el sistema de transporte público de Santiago de Chile.

Tabla 2: Especificaciones técnicas del bus Solaris Urbino 12 H2 y Xcelsior Charge H2.

Modelo bus	Solaris Urbino 12 H2	Xcelsior Charge H2
Tipo alimentación	Hidrógeno gaseoso comprimido	Hidrógeno gaseoso comprimido
Longitud [m]	12	12
Autonomía [km]	350	480
Tiempo de recarga	7 min.	6 - 10 min.
Consumo	0,08 - 0,09 [kg H2/km]	0,08 - 0,09 [kg H2/km]
Peso en vacío [kg]	13.100	13.800
Peso máximo [kg]	19.200	-
Pack de baterías	-	100 kWh
Peso/módulo celda	244	256
Peso/pack batería [kg]		
Fuente energética	Ballard Fcvelocity- HD6 (60 kW)	Ballard Fcvelocity- HD85 (85 kW)

Densidad energética combustible/batería	33 kWh/kg H ₂	33 kWh/kg H ₂
Motor eléctrico (potencia)	2 x 125 kW	160 kW
Almacenamiento combustible	36,8 kg @ 350 bar	37,5 kg @ 350 bar
Capacidad pasajeros	80	82
Energía transportada [kWh]	1214	1238

Fuente: información basada en las especificaciones técnicas de cada fabricante. [31] [30]

3.3. Infraestructura de reabastecimiento

Para la adecuada operación de cualquier tipo de vehículo es fundamental contar con una infraestructura de reabastecimiento de combustible capaz de responder ante la demanda energética de estos. En el caso de la movilidad eléctrica por celdas de combustible las estaciones de servicio, o hidrolíneas, poseen dispensadores que distribuyen el hidrógeno gaseoso desde el almacenamiento interno hasta el tanque del vehículo, de forma similar a lo que se observa en las gasolineras comunes.

En esta sección se revisará en detalle la configuración de la infraestructura de recarga específicamente para buses urbanos públicos que, por lo general, son privadas y de uso exclusivo por la operadora del transporte dentro del mismo terminal en donde se guardan dichos vehículos. Por esta razón es útil comentar las principales diferencias que existen entre este tipo de estaciones y las que están abiertas a todo usuario para abastecer a sus vehículos livianos, siendo éstas:

- **Presión de abastecimiento:** tal como se comentó en secciones anteriores, los vehículos livianos almacenan el hidrógeno a 700 [bar], mientras que los buses poseen tanques que lo mantienen a 350 [bar] [32], es por ello que el combustible disponible en las estaciones de buses se encuentra a niveles de presión distintos que los requeridos por las otras categorías vehiculares.
- **Capacidad de la estación:** es probable que la capacidad de producción y/o almacenamiento de combustible en las estaciones sea diferente debido, esencialmente, a la cantidad de hidrógeno que transportan los buses en comparación con los vehículos livianos que por consecuencia significará una mayor demanda diaria del combustible.

3.3.1. Tipos de estaciones

Es posible identificar a dos tipos de estaciones [32], según el tipo de suministro de combustible que posean, ya sea producción propia en el sitio o por provisión externa desde otro lugar.

Por un lado, las de tipo *on-site* corresponden a hidrolineras que producen el hidrógeno en el mismo sitio de dispensación del combustible y, por otro lado, las de tipo *off-site* son aquellas que se abastecen de hidrógeno desde una planta productora externa a la estación en sí, por lo que requieren de un método de traslado adicional.

Ambos tipos de estaciones están compuestas por los mismos módulos y equipos, con la única diferencia en el suministro de origen del combustible, lo cual será detallado en la próxima subsección.

3.3.2. Módulos y configuración

En general, en una hidrolinera es posible identificar cinco módulos o etapas que atraviesa el hidrógeno hasta antes de depositarse en el estanque del vehículo, estos son: Suministro, Compresión, Almacenamiento, Acondicionamiento y Dispensación, tal como lo indica la **Figura 13** en donde se define a cada etapa con un ícono característico al proceso que se cursa.

Figura 13: Esquema representativo de los módulos presentes en una estación de repostaje de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia en base a la descripción de documento "Fueling the future of mobility" [11].

A continuación, se presentan los principales elementos de cada módulo y las condiciones que deben cumplirse en cada una de ellas para obtener un adecuado funcionamiento y tener un manejo seguro del combustible.

Suministro en estaciones on-site [5]

En este tipo de hidrolíneas se utilizan actualmente dos métodos de producción de hidrógeno, en mayor medida el reformado de metano y vapor, y en menor medida, pero con grandes proyecciones de desarrollo en el mundo la electrólisis el agua.

- **Reformado de gas metano:**

Es un tratamiento térmico que utiliza metano y vapor de agua a altas temperaturas y niveles de presión para la producción de hidrógeno. Dependiendo de si el procedimiento considera la captura de dióxido de carbono o no, el hidrógeno es denominado usualmente como “azul” y “gris” respectivamente.

- **Electrólisis:**

Este proceso separa la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, utilizando electricidad. Actualmente son dos los tipos de electrolizadores que se utilizan para este método a saber: el alcalino (ALK) y el de membrana de intercambio protónico (PEM). El hidrógeno que se produce por este proceso se denomina “verde” cuando la electricidad empleada proviene de fuentes renovables, tales como energía solar o eólica.

En el caso de la electrólisis el principal insumo es la electricidad, mientras que para el reformado de vapor es el metano. Sin embargo, los dos procesos utilizan agua que debe ser tratada previamente, por tanto, es necesaria la instalación de un sistema de pretratamiento de agua. [32]

Suministro y distribución en estaciones off-site

El suministro de hidrógeno para este tipo de estaciones también puede originarse a partir del reformado de metano y vapor o electrólisis, aunque además se debe contemplar el traslado y distribución desde la planta productiva hasta la estación.

- **Distribución:**

La distribución desde el punto de producción puede realizarse mediante tuberías, contenedores o remolques tubulares (Véase **Figura 14**), dependiendo de la distancia que exista entre ambos puntos de interés. Además, el transporte del combustible puede realizarse en estado gaseoso o líquido, para lo cual se necesitan elementos diferentes que se comentan a continuación.

- Hidrógeno gaseoso (GH₂):

En este estado se puede transportar hidrógeno mediante remolque tubular, depósitos cilíndricos a bordo de un camión o tuberías, como es posible apreciar en la **Figura 14**. La elección entre una opción u otra dependerá mayormente de la distancia que exista entre el punto de producción de hidrógeno y la estación de recarga. [32]

- Remolques tubulares o depósitos cilíndricos: contienen el combustible a presiones entre 200 y 500 [bar] aproximadamente. Esto se traduce a cerca de 1.000 [kg] de combustible transportado, dependiendo del espacio disponible para el traslado (considerando a presión y temperatura ambiental, 1 [bar] y 25 [°C], una masa de 0,081 [kg H₂] por [m³]) [32].
- Tubería: si se utiliza la tubería existente (que se ocupa para el transporte de gas natural, por ejemplo) podría ser una opción más económica cuando además se requiere el traslado de una gran cantidad de hidrógeno. Las principales consideraciones y preocupaciones de seguridad se centran en la reacción de los materiales de la tubería con el hidrógeno y el control de fugas.

- Hidrógeno líquido (LH₂):

Para mantener al hidrógeno en estado líquido se requiere de un sistema adicional que sea capaz de mantenerlo a una temperatura de -253 [°C] [33], a presión ambiental. Por tanto, el único método de traslado que se está utilizando en estos casos corresponde a camiones con tanques criogénicos.

El principal beneficio que presenta este transporte por sobre los otros ya mencionados, es el aumento de la densidad del hidrógeno que, como consecuencia, implica el traslado de una mayor cantidad de este combustible en un mismo viaje (por cada [m³] hay 70,8 [kg H₂] aproximadamente [32]). Si bien en este contexto el transporte del combustible se haría en estado líquido, al llegar a la estación y abastecer a los vehículos se requiere que el hidrógeno pase por un sistema previo de vaporización para así recargar los tanques del vehículo diseñados para hidrógeno gaseoso.

Figura 14: Medios de transporte empleados para la distribución del combustible desde la planta de origen hasta la estación de reabastecimiento.



Fuente: Linde y U.S Department of Energy's.

Compresión

Este módulo cumple la función de elevar la presión del hidrógeno, ya sea proveniente de suministro on-site u off site, para posteriormente ser almacenado en un espacio más reducido, optimizándolo en caso de desearlo y abastecer a los vehículos con el nivel requerido. Es importante contar con esta unidad intermedia entre el suministro y el almacenamiento, puesto que se debe impulsar el fluido para traspasarlo a un nuevo recipiente o tanque de almacenaje.

Cuando el suministro de hidrógeno a la estación se realiza a una presión mayor que la que posee la unidad de almacenamiento no es necesaria una unidad intermedia de compresión ya que la circulación desde un punto a otro se realizaría por diferencias de presión, sin impulso adicional. Sin embargo, se debe tener en cuenta que dicha “auto circulación” del combustible funciona hasta que las presiones en ambas zonas sean similares, por lo que si se quiere traspasar mayores cantidades de hidrógeno a la estación podría ser necesario un compresor de todas formas.

En términos generales se distinguen dos tipos de compresores:

- Compresores comunes de funcionamiento continuo.
- Compresores de refuerzo (booster), se utilizan solo cuando se necesita mover el combustible de un punto a otro (desde el almacenamiento hasta el dispensador, o *surtidor*, por ejemplo).

Es importante tomar en consideración que la unidad de compresión presenta la mayor cantidad de fallos con respecto al resto de las unidades y equipos, por lo que se recomienda contar con una unidad de compresión adicional que se active en casos de falla de la unidad principal, evitando la detención de la operación de la estación.

Para el caso del hidrógeno líquido se utilizan bombas criogénicas en vez de compresores, las cuales son equipos más compactos y eficientes que los de hidrógeno gaseoso permiten el reabastecimiento directo del vehículo sin necesidad de contar con almacenamiento intermedio.

Almacenamiento

Consiste en tanques o depósitos que almacenan y mantienen de manera segura el combustible hasta su posterior uso, siendo capaces de soportar presiones elevadas según se requiera en base al tamaño de la estación y la cantidad de buses a los cuales deba abastecer diariamente. El almacenamiento del hidrógeno puede realizarse en estado gaseoso o líquido dentro de las estaciones, para lo cual se necesitan sistemas de acondicionamiento diferentes.

a) Hidrógeno líquido

Como se mencionó anteriormente, para mantener el hidrógeno en estado líquido se debe trabajar con temperaturas bajas ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), por lo tanto, es necesario almacenar en depósitos que estén aislados para evitar el intercambio de calor con el exterior. Sin embargo, es posible que el aislamiento no sea suficiente y exista un aumento de temperatura de todas formas, implicando con ello la transformación de una parte del líquido en gas, el cual podría mantenerse en el mismo depósito solo hasta cierto nivel de presión teniendo que ser evacuado posteriormente.

b) Hidrógeno gaseoso

Existen diferentes tipos de tanques para almacenar el hidrógeno gaseoso y la diferencia radica en la presión que pueden soportar los materiales de los cuales están compuestos. Si bien, a mayor presión del gas mayor cantidad de hidrógeno se puede almacenar en un mismo lugar, se deben tener en cuenta los riesgos que esto conlleva.

Acondicionamiento

A nivel internacional, la norma SAE J2601 [34] establece que el límite de temperatura admisible para el combustible al momento de circular desde el dispensador hacia el tanque del vehículo son 85 [°C]. Producto de las etapas de compresión, almacenamiento y la velocidad con la que circula el hidrógeno, este podría elevar su temperatura por lo que, la unidad de acondicionamiento se encarga de mantenerlo a -40 [°C] y de esta forma asegurar que no se sobrepasará el límite fijado por norma [34].

Para el caso en que el hidrógeno se maneje en estado líquido hasta antes de llegar al dispensador, el sistema de acondicionamiento tiene la función de vaporizarlo mediante intercambiadores de calor con el fin de que circule en estado gaseoso hacia el tanque de almacenamiento interno del bus.

Dispensación

El dispensador, o también llamado surtidor, es un sistema o dispositivo que permite la circulación del hidrógeno desde el almacenamiento en la estación hasta el tanque del vehículo al nivel de presión requerido que, para el bus, es 350 [bar]. Este dispositivo cuenta con una boquilla para adaptarse al receptáculo del bus y además está conectado a un sistema de control que informa a través de una pantalla las condiciones de recarga, como presión y temperatura.

De manera más específica, los principales componentes de este sistema son:

a. Dispositivos de ruptura

Son acoplamientos de seguridad para las mangueras y para el sistema de dispensación de hidrógeno comprimido los cuales reducen el escape de combustible gaseoso en caso de que exista fuga. Esto lo logran cerrando de manera automática la salida de hidrógeno del dispensador y despresurizando la manguera. Estos elementos están normados por la ANSI/CSA HGV 4.4-2013.

b. Conectores

Son boquillas que conectan la manguera dispensadora con el receptáculo del vehículo.

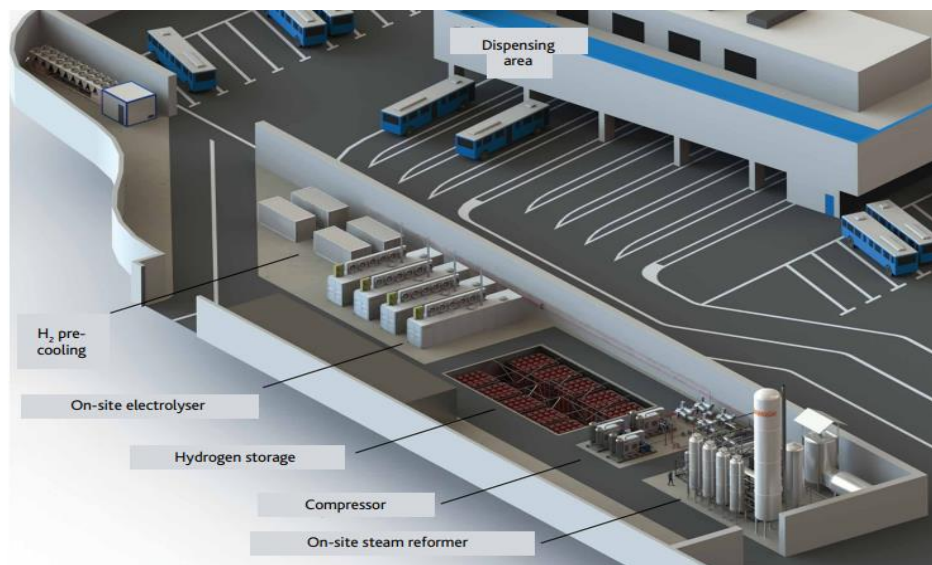
c. Dispensadores

Máquina que bombea el combustible almacenado en la estación hacia el tanque del vehículo.

Tanto los componentes empleados en este sistema como el proceso de llenado están normados bajo estandarizaciones internacionales. La norma SAEJ2600 y la ISO 1726:2012 plantean las condiciones que deben cumplirse para el reabastecimiento de vehículos terrestres impulsados por hidrógeno. Del mismo modo, SAE J2601-2 detalla los requisitos aplicables a los sistemas de dispensación de hidrógeno para alimentar en específico a vehículos de servicio pesado como autobuses. Con ella se busca garantizar que el combustible no eleve su temperatura por sobre los 85 [°C] y además se definen tres velocidades de recarga, lenta: 30 [g H_2 /s], media: 60 [g H_2 /s] y alta: 120 [g H_2 /s].

A modo de visualizar lo recién comentado, se muestra la **Figura 15** en la que es posible apreciar los elementos y módulos presentes en una estación del tipo on-site exclusiva para uso de buses urbanos de transporte público. En ese caso cuenta con los dos tipos de suministro, reformado de metano y electrólisis, un almacenamiento de hidrógeno subterráneo, una unidad de compresión y una de acondicionamiento o preenfriamiento.

Figura 15: Representación gráfica de una estación de recarga especializada para buses dentro del terminal de estos, utilizando el método de electrólisis y reformado de metano en la misma instalación, para la producción del combustible.



Fuente: Abengoa In-novación.

3.4. Consideraciones de seguridad

Una de las grandes barreras ante el desarrollo y despliegue de la tecnología basada en hidrógeno ha sido el temor y el desconocimiento ante el manejo de este combustible, ya que en décadas anteriores se le ha relacionado, de forma equivocada, con eventos catastróficos tales como la detonación o el encendido de llamas.

Para derribar estos mitos y perder el miedo al uso de la tecnología es fundamental informar a la ciudadanía acerca de las propiedades del hidrógeno, y los posibles riesgos al que se está expuesto como lo que ocurre con la manipulación de cualquier otro combustible.

En la siguiente sección se revisarán las características propias del hidrógeno y sus riesgos asociados, junto con presentar los métodos de seguridad empleados, tanto en los vehículos de celdas de combustible como en las estaciones de reabastecimiento. Además, se ponen en contraste las propiedades del hidrógeno con respecto a combustibles que comúnmente se usan para el transporte.

3.4.1. Propiedades del hidrógeno y riesgos asociados a su uso como combustible

El hidrógeno es el elemento químico más simple, en términos de composición, y más abundante del universo a pesar de que en su estado natural no es posible encontrarlo como elemento aislado. Gracias a los procesos que se presentaron en secciones anteriores es posible separar al hidrógeno de los compuestos de origen, por lo que es de suma importancia examinar las propiedades que lo caracterizan por sí solo para poder identificar los posibles riesgos que, como todo combustible, tiene asociados.

En primer lugar, se presentan los dos principales focos de riesgo relacionados al manejo del hidrógeno, siendo éstos [29]:

1. Fugas de gas

Las fugas de hidrógeno se refieren al escape de gas desde cualquier elemento o tubería por el cual circule el combustible, lo que podría resultar peligroso en caso de que estas se den en espacios cerrados y se logre una concentración que se encuentre dentro del rango de inflamabilidad.

Se debe tener especial cuidado en las zonas de almacenamiento, tales como los cilindros que van a bordo de los vehículos o los contenedores situados en las estaciones, ya que en ellos se mantienen grandes cantidades de hidrógeno y a altos niveles de presión.

2. Encendido de llama

El encendido de la llama o incendios de hidrógeno surgen como consecuencia de una fuga previa en un sector confinado en donde se alcanzó el nivel de concentración óptima para la inflamación. Este fenómeno puede manifestarse mediante llamas, humo u olas de calor, los cuales son difíciles de detectar debido a las propiedades físicas de este combustible.

Al igual que para el caso de las fugas, el principal cuidado está en aquellos elementos que contienen el hidrógeno a altos niveles de presión que pueden dar lugar a un flujo de partículas más potente.

Los riesgos recién mencionados están directamente relacionados con las propiedades físicas y químicas del hidrógeno, algunas pueden ser beneficiosas para estos eventos, mientras que otras pueden incrementar los niveles de peligrosidad. Las principales propiedades son:

- Es **inodoro, incoloro e insípido**, por lo que es difícil identificar su presencia en el ambiente a simple vista a la luz del día o por el olfato. Esta característica podría ser peligrosa en caso de que exista fuga del gas en una zona confinada que no pueda detectarse.
- Se caracteriza por ser el gas más ligero del universo al poseer una **densidad relativa** 14 veces más baja que el aire [35] lo cual, desde el punto de vista de la seguridad, facilita su rápida dispersión en el ambiente en zonas abiertas y ventiladas. Por esto, en caso que de exista una fuga del combustible en un vehículo o en el área de almacenamiento de una estación de repostaje, mientras exista ventilación no se generarán concentraciones peligrosas que den lugar a la formación de atmósferas inflamables.
- Su **viscosidad** es muy baja, es decir, el tamaño de sus partículas es muy pequeño en comparación con otros elementos químicos. Esto tiene una implicancia en cuanto al comportamiento que presenta el hidrógeno en contacto con ciertos materiales, pues sus átomos se adhieren con facilidad a las paredes de equipos, dispositivos y todo tipo de elemento de los sistemas que lo operan produciendo una degradación temprana de éstos. Asimismo, para contener a este combustible de forma segura se deben considerar contenedores herméticos que eviten eventuales fugas. [5]
- Se considera que es un gas **no respirable** ya que sus partículas desplazan a las del aire, pudiendo presentarse una situación de riesgo en caso de tener concentraciones altas de hidrógeno en espacios cerrados. Es importante destacar que esto no es una característica propia de este combustible, sino que ocurre con cualquier otro gas diferente del aire.

- Si bien es un gas que posee una gran **densidad gravimétrica** o másica (33,6 [kWh/kg] [36]) su **densidad volumétrica** es baja. Esto quiere decir que la cantidad de energía útil del hidrógeno por unidad volumétrica es relativamente baja, ya que bajo condiciones ambientales ésta tiene un valor de 0,003 [kWh/L] [37] (equivalente a 0,083 kg/m³ (<https://h2tools.org/tools>) Por esta razón se debe manejar el hidrógeno gaseoso a presiones muy elevadas para poder obtener una masa considerable, y por ende una buena cantidad de energía, lo cual implica contar con equipos altamente seguros y capaces de contener el gas a altos niveles de presión.
- Es un gas altamente **inflamable** debido a que con concentraciones de 4% a 75% de sus partículas en el aire se genera una atmósfera propensa al encendido de llama [38]. Sin embargo, al ser un gas tan liviano con respecto al aire se hace difícil el confinamiento de sus partículas a tal punto de lograr concentraciones riesgosas, pues se dispersa rápidamente en el ambiente. Por tanto, es fundamental mantener los espacios de circulación de hidrógeno o suficientemente ventilados.
- Otro de los puntos desfavorables, desde el punto de vista del riesgo, es su bajo punto de **energía mínima de ignición**. Esto significa que, en caso de tener una concentración peligrosa de hidrógeno, la mezcla podría encender una llama con la mínima fuente de ignición presente en el ambiente, tal como una chispa.
- Con respecto a la **temperatura de auto ignición**, para que el combustible encienda una llama sin una fuente externa de calor se debe alcanzar una temperatura de 585 [°C] [38] , un valor muy por encima en comparación a otros gases combustibles tales como gasolina o gas natural.

3.4.2. Comparación de riesgos con otros gases combustibles

A pesar de que el hidrógeno es un combustible que aún genera cierto temor en la población, los riesgos a los que se está expuesto producto de su manipulación no son mayores que los que se presentan en los combustibles fósiles comúnmente utilizados, tales como Gasolina o Diésel, los cuales podrían incluso ser más peligrosos.

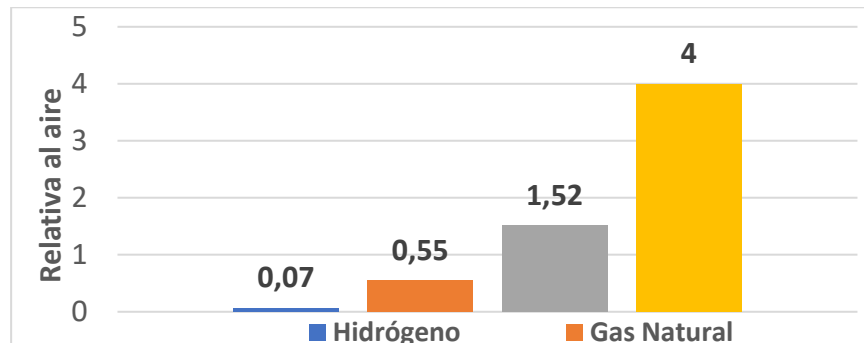
Si bien el mayor riesgo está en el amplio rango de inflamabilidad que posee, las condiciones necesarias para que surja un evento peligroso son muy particulares y no son fáciles de alcanzar debido, principalmente, a su baja densidad y sus pequeñas partículas que vuelven complejo el confinamiento del gas. Incluso si se llegará a la condición de encendido de una llama, esta se disiparía hacia arriba y se apagaría rápidamente debido a la propagación de sus partículas en el aire.

A continuación, se ponen en perspectiva las principales propiedades que se asocian a eventos riesgosos de los combustibles Hidrógeno, Gas Natural, Propano y Vapor de Gasolina. Esto con el fin de demostrar que el hidrógeno no es más peligroso que los compuestos empleados actualmente en el sector de la energía, y en específico del transporte.

➤ Densidad:

Del **Gráfico 1** es posible apreciar la densidad relativa de los gases combustibles con respecto a la del aire, en donde se demuestra que el hidrógeno es el elemento químico más liviano y que presenta grandes ventajas de seguridad con respecto a los demás, pues se dispersa mucho más rápido en el ambiente.

Gráfico 1: Densidad de diferentes gases combustibles, con respecto a la densidad del aire.

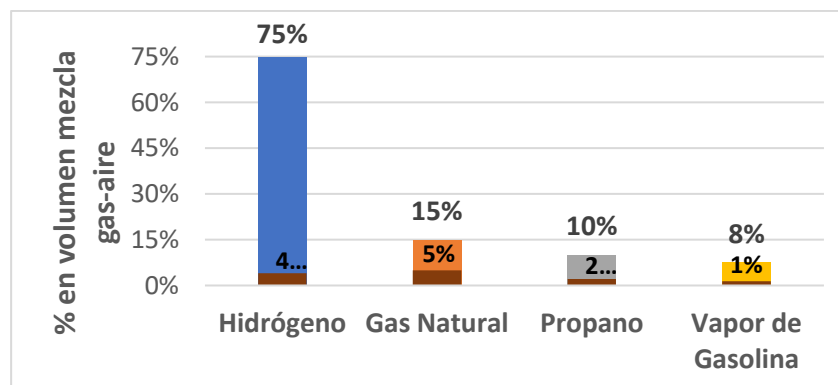


Fuente: Elaboración propia en base a la información de Hydrogen Tools [38].

➤ Rango de inflamabilidad:

A partir del **Gráfico 2** es posible comparar el rango de inflamabilidad de cada gas, presentando los valores mínimos y máximos de las concentraciones de éstos en el aire que den paso a la formación de una atmósfera inflamable. Si bien el hidrógeno presenta el rango más amplio, la concentración óptima de inflamabilidad es del 29%, además, como se dijo anteriormente no es fácil lograr tales concentraciones del gas en el aire debido a su baja densidad y rápida disipación hacia la atmósfera.

Gráfico 2: Rango de inflamabilidad de diferentes gases combustibles.

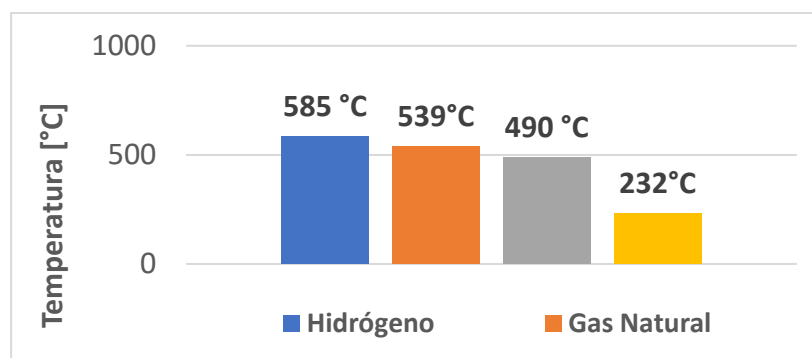


Fuente: Elaboración propia en base a la información de Hydrogen Tools [38].

➤ **Temperatura de autoignición:**

En el **Gráfico 3** se presenta la temperatura de autoignición de los combustibles, en donde se observa que el Hidrógeno posee el nivel más alto. Esto quiere decir, por ejemplo, que el Vapor de Gasolina presenta mayor riesgo de auto encendido al requerir menos de la mitad de temperatura que para el caso del Hidrógeno.

Gráfico 3: Temperatura de autoignición de diferentes gases combustibles



Fuente: Elaboración propia en base a la información de Hydrogen Tools [38].

Es importante visualizar que los riesgos a los que se expone el uso y manipulación del hidrógeno son similares a los que se tienen en los combustibles convencionales que se han utilizado por décadas.

3.4.3. Sistemas de seguridad en vehículos

Para prevenir eventos peligrosos los vehículos de celdas de combustible, las estaciones de repostaje y los dispositivos que manipulan el hidrógeno están equipados con sistemas de seguridad de alto estándar, siendo capaces de detectar tempranamente posibles fugas de gas y/o incendios.

Los principales métodos de seguridad que se implementan, son los siguientes [29]:

- **Detector de fuga**

Corresponden a sensores que detectan concentraciones a partir de 0,2 y 1% de hidrógeno en el aire [29]. Se ubican en zonas estratégicas en donde suele haber mayor probabilidad de escape de gas, como cilindros de almacenamiento y módulo de celdas de combustible, emiten una alarma de advertencia y si la concentración aumenta, en caso de tratarse de un vehículo, se apaga el motor automáticamente. Cabe destacar que las señales de advertencia se emiten cuando la concentración de hidrógeno está aún muy por debajo del rango mínimo de inflamabilidad, por lo que actúa de manera preventiva y da tiempo al operador o conductor de atender la falla.

Si se detecta una fuga de hidrógeno en un vehículo el conductor debe apagar el motor, desconectar las conexiones eléctricas y ventilar las líneas que transportan el combustible dentro del bus. Luego de eso se identifica el elemento que ocasionó el problema y se ajusta o reemplaza en caso de ser necesario, todo esto debe realizarse en un lugar libre de fuentes de ignición cercanas y en espacios abiertos al ambiente.

- **Detector de incendio**

Para el caso de los buses, estos están equipados con un sistema de supresión de incendio, el cual detecta la presencia de una ignición mediante sensores ubicados en ciertas partes del vehículo. Operan enviando una advertencia al conductor a través del tablero eléctrico, el motor se apaga automáticamente y, posteriormente, se activan los inhibidores de incendio que consisten en polvo químico seco (purple-k) [29].

- **Cilindros de almacenamiento**

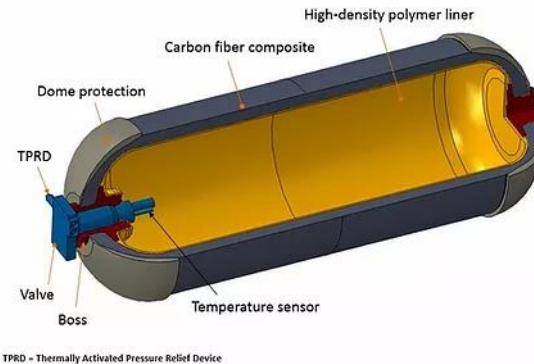
Debido a que estos elementos presentan mayor riesgo de fuga de gas, por la cantidad de combustible contenida a altos niveles de presión, se equipan con dispositivos especiales que aseguran y advierten al conductor cualquier anomalía en cuanto a la presión y temperatura en su interior.

El sistema principal de seguridad con el cual son equipados los cilindros es el Dispositivo de Alivio de Presión por Temperatura (TPRD por sus siglas en inglés) [7] (Véase **Figura 16**), compuesto por sensores de temperatura que detectan anomalías relacionadas a la presión al interior del contenedor que provocan una variación de la temperatura del combustible. En caso de activarse se envía una señal de advertencia al conductor y se corta el suministro de hidrógeno hacia los canales internos mediante válvulas solenoides. Si la temperatura y presión dentro del cilindro aumentan, parte del hidrógeno gaseoso es liberado al ambiente a través de válvulas de alivio de presión.

Asimismo, cuando el motor del vehículo se apaga o si se detecta alguna colisión, las válvulas se cierran automáticamente con el fin de evitar concentraciones de combustible en las tuberías y elementos internos de distribución.

En general, los dispositivos de seguridad operan liberando hidrógeno al ambiente, por lo cual los cilindros de almacenamiento se ubican en el techo del bus, permitiendo el escape hacia el aire exterior sin tener riesgo de concentraciones en espacios confinados.

Figura 16: Ilustración representativa de un cilindro de almacenamiento de hidrógeno gaseoso, empleado en los vehículos.



Fuente: U.S Department of Energy. [7]

Por último, los cilindros de almacenamiento son sometidos a pruebas de seguridad de alta exigencia en las que se asegura su correcto funcionamiento en todo tipo de situaciones, ya sea colisión, incendio o fuga de combustible.

Además, se deben tener en cuenta los siguientes puntos con respecto al espacio físico que tenga contacto directo con el hidrógeno en el vehículo [29]:

- Las construcciones y montajes deben estar hechos con materiales que no combustionen y que no se vean afectados por tener contacto directo con el hidrógeno.
- Los tanques de almacenamiento de hidrógeno se encuentran posicionados estratégicamente en la parte superior del bus, de tal modo que, si existe alguna fuga de este gas, este se dispersará rápidamente hacia el ambiente y no se generará una acumulación peligrosa.
- Los sistemas de ventilación mecánica deben tener entradas bajas al suelo y salidas en el punto más alto del bus. Se debe considerar la posibilidad de proporcionar ventilación tanto para las condiciones normales como para las situaciones de emergencia.
- El cierre de válvulas debe ser automático y es necesario que se active si se detecta una fuga o un incendio, ya sea a bordo del bus o en la estación de recarga de hidrógeno.
- Se debe evitar contar con una fuente de ignición en las áreas de almacenamiento.
- Los equipos eléctricos para detectar fallas y fugas deben ubicarse cerca de los puntos de almacenamiento de combustible.

3.4.4. Sistemas de seguridad en estaciones de recarga

Al igual que en los vehículos y con el fin de evitar posibles daños y accidentes, las estaciones de recarga deben estar equipadas con sistemas de seguridad que consideren principalmente lo siguiente [39]:

- Controlador lógico programable (PLC) de seguridad para supervisar los procesos críticos durante el abastecimiento de combustible.
- Dispensador de hidrógeno con un sensor de rotura e inclinación y un control de fugas.
- Monitoreo constante de nivel de oxígeno y presencia de fugas de gas o encendido de llama en la sala de compresores.
- Tanques aislados equipados con válvulas de cierre automático que se activan en caso de existir fuga.
- Ventilación forzada continua en áreas de riesgo para evitar la aparición de una atmósfera explosiva.
- Instalación de letreros de identificación de peligros, "No fumar" y "Gas comprimido" en todas las entradas a las zonas que contienen materiales peligrosos y en los cilindros de almacenamiento.
- En caso de que el almacenamiento de hidrógeno esté dispuesto al aire libre, se debe proteger la instalación frente a temperaturas extremas (por debajo de -20°C y por encima de 50°C).
- El área alrededor de las instalaciones de hidrógeno deberá mantenerse libre de vegetación seca y de material combustible.

3.4.5. Normativa y códigos regulatorios

Otro de los pilares fundamentales para llevar a cabo el despliegue de una tecnología y una industria es la normativa y regulación al respecto. El combustible en cuestión debe ser reconocido como tal asegurando que su manipulación y uso se encuentran dentro de los márgenes establecidos por ley, para brindar la confianza necesaria a todos los posibles usuarios y operadores.

En este aspecto, es útil e importante revisar las principales normas y códigos que se están implementando a nivel internacional para regular y fiscalizar el uso correcto del hidrógeno [40], por lo que se presenta la **Tabla 3** en donde es posible apreciar las principales normativas vigentes al día de hoy:

Tabla 3: Principales códigos y normas implementadas a nivel mundial para el manejo adecuado del hidrógeno en el transporte.

Norma/Código	Alcance
SAE J2600	Se aplica al diseño y prueba de conectores, boquillas y receptáculos de combustible
SAE J2601-2	Protocolo de abastecimiento de combustible para vehículos pesados de superficie, impulsado por hidrógeno gaseoso
SAE J2719	Requerimientos referentes a la calidad del hidrógeno para vehículos que utilizan celdas de combustible tipo PEM.
SAE J2578	Prácticas recomendadas para la seguridad general del vehículo con celda de combustible
SAE J2579	Norma para sistemas de combustible en celdas de combustible y otros vehículos de hidrógeno
NFPA 2-2016	Consideraciones de seguridad para la generación, almacenamiento y manejo del hidrógeno.
ANSI/CSA HGV 4.9-2016	Protocolo para diseño, instalación, operación y mantención de estaciones de recarga (basado en normas U.S.)
ISO 19880-1	Requerimientos para estaciones de recarga con hidrógeno gaseoso
ANSI/CSA HGV 4.1-2013	Requisitos de los sistemas de dispensación de hidrógeno

Fuente: Sitios web oficiales de cada una de las entidades normativas.

Hoy en día el hidrógeno no es reconocido en Chile como un combustible y/o vector energético, por lo que queda trabajo por hacer desde el ámbito público y privado para establecer las bases de una legislación y fiscalización que aseguren la adecuada manipulación del combustible tanto para quienes operen los dispositivos involucrados en la cadena de valor, como para la población general y medio ambiente.

El conocimiento acabado acerca del funcionamiento de los FCEB y su infraestructura de recarga permite visualizar el potencial de la tecnología aplicada a esta categoría vehicular, la cual se presenta como una de las mejores opciones en cuanto a capacidad técnica, logística operacional e impacto medio ambiental. Además, profundizar en las propiedades del hidrógeno, los riesgos que se le asocian y los sistemas de seguridad implementados actualmente a nivel global, es fundamental para brindar confianza a la población y derribar posibles barreras que impidan el despliegue y desarrollo de la tecnología.

Capítulo 4: Estudio de caso para la ciudad de Santiago de Chile

En el siguiente capítulo, en primer lugar, se realiza una revisión de los actores públicos y privados de la electromovilidad en Chile, identificando las oportunidades de desarrollo del hidrógeno en el transporte de la ciudad en base a aquellas líneas de trabajo actuales y futuras que están llevando a cabo las principales instituciones involucradas en el área.

En segundo lugar y de acuerdo al análisis previo de los actores de electromovilidad, se presenta un caso de aplicación propuesto para la ciudad de Santiago, en donde se busca homologar las operaciones que actualmente están realizando los buses eléctricos de batería para así determinar qué se necesitaría para implementar esta tecnología. Como antecedente al estudio se revisa el contexto actual del transporte público de la ciudad y se identifican las oportunidades para una posible implementación de celdas de combustible en sus sistemas de propulsión, como complemento a las baterías de litio.

Dentro del caso de aplicación se contempla un análisis completo para la flota de FCEB, basado en parámetros tales como tamaño de flota y planes de expansión, kilometraje diario recorrido por los buses, demanda de combustible, tiempos de recarga de los vehículos, infraestructura necesaria para el abastecimiento de los buses, la demanda de insumos para la producción propia del combustible, en este caso hidrógeno verde y, finalmente, un diagnóstico de costos asociados a la producción y distribución del mismo.

4.1. Actores públicos y privados de la electromovilidad en Chile

En Chile existen diferentes acuerdos y asociaciones que han surgido en el marco de la electromovilidad con el objetivo de impulsarla y promoverla desde diferentes áreas de desarrollo. Dentro de estos hitos son muchos los actores involucrados y comprometidos con el tema, en donde cada uno aporta desde un sector específico de la sociedad, ya sea desde la academia, el sector público o el sector privado.

Para comenzar con esta sección, se presenta el listado de los actores clasificados por el sector de la sociedad al cual representan, y posteriormente, se revisan los hitos más importantes con respecto al tema.

Como se mencionó, los actores pueden clasificarse en tres grandes sectores dependiendo el rol que cumplen dentro del impulso y promoción de la electromovilidad en el país, estos son la academia, el sector público y el privado [26] (Véase **Tabla 4**, **Tabla 5** y **Tabla 6**).

Por un lado, la academia cumple la función de promover el uso de la movilidad eléctrica mediante la formación de capital humano especializado y el impulso del desarrollo de proyectos de investigación en este ámbito. Por otro lado, el sector público está comprometido con el desarrollo de políticas públicas y la promoción del uso de la movilidad eléctrica en Chile, la regulación y fiscalización de proyectos relacionados, el despliegue de puntos de carga a lo largo del territorio nacional, y presentar alternativas de financiamiento para proyectos de esta índole. Finalmente, el sector privado contribuye principalmente a través del aumento en la oferta de vehículos eléctricos, aumento de los puntos de carga para los vehículos, y apoyo técnico en proyectos de movilidad eléctrica.

Tabla 4: Actores de electromovilidad en Chile, provenientes del sector de la academia.

Academia		
 UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA	 Centro UC Energía	 DuocUC
 UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	 UNIVERSIDAD SAN SEBASTIAN	 Facultad de Ciencias de la Ingeniería UCh
 nacap UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CHILE INSTITUTO PROFESIONAL CENTRO DE FORMACIÓN TÉCNICA	 UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS	 UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA TEMUCO - CHILE
 UCSC	 Universidad de Concepción	 TALCA UNIVERSIDAD CHILE
	 CENTRO DE ENERGÍA UNIVERSIDAD DE CHILE	

Tabla 5: Actores de electromovilidad en Chile, provenientes del sector público.

Público		
 Ministerio de Energía Gobierno de Chile	 SEC SUPERINTENDENCIA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES	 CNE 40 AÑOS COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA
 CORFO	 JUNAEB Ministerio de Educación Gobierno de Chile	 BancoEstado

Tabla 6: Actores de electromovilidad en Chile, provenientes del sector privado.

Privado





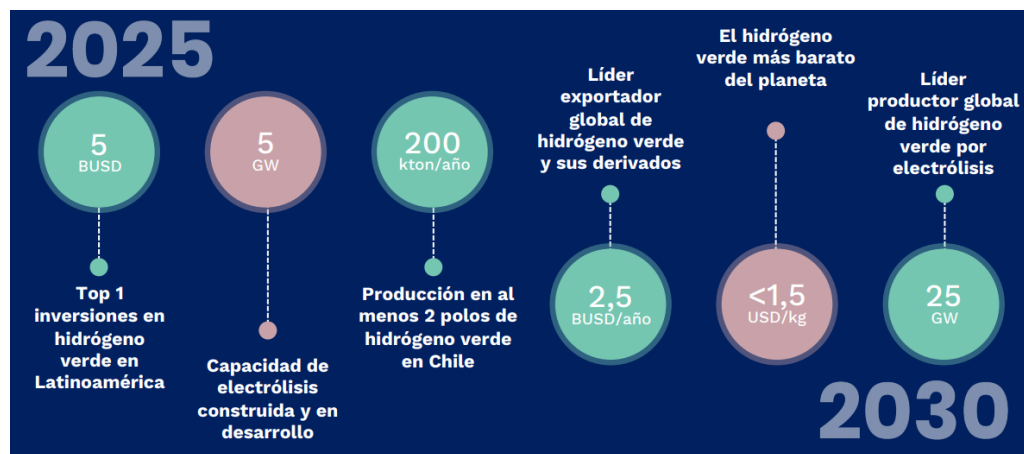
Uno de los actores más relevantes a nivel nacional con respecto al uso del hidrógeno como combustible es la Asociación Chilena de Hidrógeno (H2 Chile), la cual es del tipo gremial y fue fundada el año 2018 en el marco de la descarbonización energética en el país. Su objetivo principal es fomentar el desarrollo del hidrógeno como vector energético, promoviendo su investigación, desarrollo y uso de las aplicaciones industriales, comerciales, residenciales y de movilidad [21].

Con respecto a los hitos más relevantes que han surgido por el fomento de la electromovilidad en Chile y, la producción y aplicación del hidrógeno como energético, se destacan los siguientes:

- **Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde:**

El Ministerio de Energía, con el apoyo técnico de empresas, académicos, expertos y participación ciudadana, ha elaborado y publicado recientemente en noviembre de este año 2020 una estrategia nacional de hidrógeno verde para Chile. Esta fue creada en el marco de la transición energética hacia la carbono neutralidad y tiene seis objetivos, presentados en la **Figura 17**, de los cuales contar con 5 [GW] de capacidad de electrólisis en desarrollo al 2025, producir el hidrógeno verde más barato del mundo para el año 2030 y estar entre los 3 exportadores más importantes para el año 2040, son las principales metas [41].

Figura 17: Diagrama ilustrativo que muestra las principales metas establecidas en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile.



Fuente: Documento oficial de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, Ministerio de Energía de Chile, noviembre 2020 [41].

Las ambiciones planteadas en la estrategia están sustentadas en 6 pilares, un estado involucrado en el impulso de la industria del hidrógeno, un equilibrio entre los recursos naturales y la calidad de vida de la población, una vocación exportadora de este combustible limpio hacia todo el mundo en pro de la transición energética, una labor complementaria entre esta energía y otras del tipo limpia para alcanzar la carbono neutralidad, una participación de todos los sectores de la sociedad y, por último, un país facilitador en el impulso de proyectos públicos y privados en torno al mercado global del hidrógeno verde.

- **Compromiso público-privado:**

El año 2018 se creó un compromiso entre el Ministerio de Energía de Chile, empresas e instituciones del sector público y privado con el fin de impulsar la electromovilidad. Dicho acuerdo se basa en seis principales ejes de acción, formación, información, vehículos, cargadores, investigación y colaboración, los cuales contemplan acciones tales como aumento en la oferta de vehículos eléctricos y su infraestructura de carga en variados puntos del país, compromiso de formar capital humano en estudios relacionados a las energías limpias en diferentes niveles de especialización, desarrollo de estudios e investigaciones que puedan contribuir con el avance de nuevas tecnologías [42]. Son muchas las empresas e instituciones que han colaborado desde que se firmó este acuerdo y que han permanecido y/o sumado durante los años 2018, 2019 y 2020, las cuales se han dispuesto de manera general en las tablas presentadas al inicio de la sección.

- **Centro Nacional de Electromovilidad (CENAEM):**

En la misma línea de promover e impulsar la movilidad eléctrica, en mayo del año 2020 se creó el CENAEM como respuesta ante la convocatoria realizada por la Corporación de Fomento a la Producción (CORFO). Este consorcio está encabezado por la Universidad Técnica Federico Santa María, junto con la participación de más de 40 instituciones del ámbito público privado, y tiene por objetivo acelerar los procesos de adopción de electromovilidad en Chile, enfocándose en los problemas y requerimientos para el desarrollo y la implementación de estas nuevas tecnologías [43].

Tomando en cuenta los planes que se han propuesto desde el sector público y privado en temas relacionados a la descarbonización de la matriz energética en Chile mediante el uso de hidrógeno verde, sumado a la meta que se ha propuesto el gobierno de contar con un transporte público completamente eléctrico para el año 2040, los buses urbanos son potenciales candidatos para hacer uso de este gas como principal fuente de abastecimiento energética.

4.2. Contexto actual del sistema de transporte público de la ciudad

Desde el año 2019 en la ciudad de Santiago el encargado del sistema de transporte público es “Red Metropolitana de Movilidad” (RED), el cual cumple la función de conectar a las seis empresas concesionarias que operan los buses urbanos, junto con el sistema de movilidad Metro de Santiago y a Metro Tren. Este sistema se instauró en reemplazo del antiguo Transantiago con el fin de mejorar la experiencia para los usuarios entregando, entre otras cosas, una nueva flota de buses con exigencias medioambientales más estrictas.

Hasta febrero del año 2020 se contabilizó un total de 6.700 buses circulando en las calles, de los cuales 996 pertenecen al nuevo estándar medioambiental, con 610 de estos a diésel de norma Euro VI y 386 eléctricos de batería de litio [44]. Desde el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones anunciaron su meta a corto de plazo de renovar la flota de buses alcanzando a 2.000 unidades eléctricas para el año 2022, equivalente al 30% del total de estos vehículos, además de electrificar el 100% para el año 2040 [26] como objetivo a largo plazo.

Si bien los buses eléctricos de batería han dado resultado en su funcionamiento y comodidad para los usuarios del sistema público, para alcanzar la meta de contar con la flota completamente eléctrica será necesario replantear la logística operacional o complementar a estos con una nueva tecnología considerada cero emisiones, siendo el hidrógeno el candidato más adecuado.

Lo anterior se debe a que, dependiendo de la distancia de cada recorrido y la frecuencia que este demande, las capacidades técnicas de las baterías de litio no serían suficientemente eficientes en su operación a causa, principalmente, de la autonomía que les brinda a los vehículos y a los largos tiempos que requieren para recargar su energía obligándolos a detener su operación por hasta 3 o 4 horas, en base al cargador utilizado.⁴

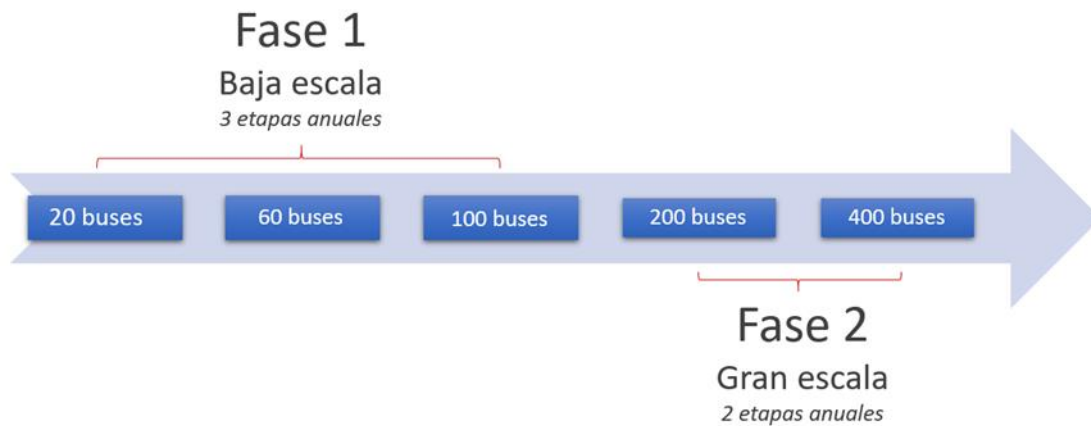
4.3. Resultados y parámetros técnicos

Para obtener los resultados mencionados al inicio de la sección, se simuló la entrada de una flota de FCEB al sistema de transporte público de la ciudad de Santiago en un rango temporal de 5 años, en donde se estimó un crecimiento paulatino en la cantidad de buses en operación hasta completar un total similar a la flota de BEB en la ciudad registrados hasta febrero del año 2020, para poder tener una referencia y punto de comparación. Para ello se dividió dicho despliegue en dos grandes fases, la primera a baja escala, y la segunda a gran escala, como es posible apreciar en la

Figura 18 en la que se resume el desarrollo de dicha simulación.

⁴ Información basada en cargadores de 80 [kW] de potencia. Fuente: Consulta a experto Rodrigo Tapia.

Figura 18: Diagrama descriptivo de las etapas llevadas a cabo en el despliegue de la flota de FCEB dentro de un rango de 5 años.



Fuente: Elaboración propia.

De forma más detallada, los parámetros considerados para el análisis y los resultados obtenidos, son los siguientes:

Tamaño de la flota y planes de expansión

En primer lugar, se estimó el tamaño de la flota inicial desplegada en la ciudad, el tamaño final, y los períodos en que se deben realizar las expansiones pertinentes hasta alcanzar la meta final de 400 buses.

a) Tamaño inicial

Para el primer despliegue de buses oficialmente operativos, posterior a las pruebas pilotos correspondientes que se requieran y recomienden por el fabricante, se estima que un tamaño óptimo de la flota sería de al menos 20 unidades, ya que de esta forma se estarían aprovechando de manera adecuada las inversiones realizadas para instalaciones y la infraestructura de abastecimiento.

b) Tamaño final

A modo de replicar el proyecto de los buses eléctricos a batería que está en marcha actualmente, el tamaño final correspondería al número de unidades que posee hoy en día la flota operativa, correspondiente a 400 vehículos. Cabe destacar que se utiliza esta cifra para homologar de mejor forma ambos proyectos.

c) Periodos de expansión

Para llevar a cabo el despliegue de todas las unidades planificadas, se consideraron dos fases de expansión, una de baja escala y otra de gran escala. Cada una de estas fases contempla etapas anuales hasta lograr la meta final, sujeto a los resultados satisfactorios que se obtengan en una primera instancia:

Fase 1: Despliegue a baja escala

- **Año 1:** 20 buses, operación inicial
- **Año 2:** adquisición de 40 nuevos buses, alcanzando un total de 60 para el segundo año operativo.
- **Año 3:** adquisición de 40 nuevos buses, alcanzando un total de 100 al tercer año.

Fase 2: Despliegue a gran escala

- **Año 4:** 100 buses nuevos para la flota, completando un total de 200 unidades.
- **Año 5:** último período de expansión, 200 buses más para alcanzar el total de 400.

Kilometraje diario de los buses

En cuanto a la distancia que recorren los buses se estimó la distancia mínima y máxima que recorren actualmente los BEB en Santiago en 1 día, considerando todas las líneas por las cuales circulan y la frecuencia de operación (Véase **Tabla 7**). Esta información es la base para el posterior cálculo de demanda de energía y combustible.

Tabla 7: Estimación de la distancia diaria a recorrer por cada bus, en promedio

Promedio recorrido diario [km/día]	Mínima	150
	Máxima	350
	Promedio	250

Fuente: Sitio web de RED [45].

Consumo de combustible

Luego, en base a las distancias diarias consideradas en el punto anterior, se calculó el consumo de combustible de acuerdo a la información técnica de dos de los buses que se han utilizado en proyectos en Europa y Estados Unidos, detallada en la **Tabla 8**. Posteriormente, en la **Tabla 9** **Tabla 8** se muestra la demanda de combustible diaria por la flota completa de buses en función de la fase de expansión en curso.

Tabla 8: Estimación del consumo diario, en promedio, para un bus de celda de combustible.

Consumo diario por bus [kgH ₂ /día/bus]					
Modelo bus			Xcelsior Charge H2 New Flyer	Solaris Urbino 12 H	Promedio entre ambos
Consumo kgH ₂ /km			0,08	0,1	0,09
Consumo diario			[kgH ₂ /día]		
Promedio recorrido diario [km/día]	min	150	12	15	13,5
	max	350	28	35	31,5
	promedio	250	20	25	22,5

Información basada en el consumo energético de los buses Xcelsior Charge H2, New Flyer, y Solaris Urbino 12H [30] [31].

Utilizando la información del consumo de combustible promedio entre ambos modelos de buses y los recorridos diarios (considerando distancias mínimas, máximas y el promedio entre las dos posibilidades), se obtuvo el consumo diario de la flota completa de acuerdo a la fase de expansión en curso. Para ello se empleó la siguiente expresión matemática:

$$(2) \text{ Consumo diario}_{\text{flota total}} = \text{Consumo promedio por bus} \cdot \text{recorrido diario promedio} \cdot n^{\circ} \text{ buses}$$

Tabla 9: Consumo diario de combustible de la flota completa de buses de acuerdo con la etapa de expansión en curso

CONSUMO DIARIO FLOTA TOTAL [KG H ₂ /DÍA]			
TAMAÑO FLOTA [N° BUSES]	Mínima	Máxima	Promedio
20	270	630	450
60	810	1.890	1.350
100	1.350	3.150	2.250
200	2.700	6.300	4.500
400	5.400	12.600	9.000

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior refleja la demanda por hidrógeno que se debe suplir por las estaciones de abastecimiento, ya sea dentro del depósito o fuera de este, para poder alimentar a la flota completa o parcial dependiendo de la cantidad de terminales de buses que se pretendan instalar y la capacidad de cada una.

Tiempos de recarga

Otro parámetro relevante es el tiempo que toma cada bus en rellenar su tanque de almacenamiento, desde que se posiciona al lado del dispensador hasta que termina de recargar su depósito de almacenamiento interno. En la **Tabla 10** se muestra una estimación de dicho tiempo en base a un valor mínimo y máximo que se ha registrado por bus en proyectos internacionales previos y, en segundo lugar, en la

Tabla 11 se muestra una estimación del tiempo total que tardaría la flota completa en abastecerse, en función del número de dispensadores disponibles en la estación.

Tabla 10: Estimación de los tiempos considerados para la carga de cada bus, incluyendo la maniobra de la llegada de los vehículos hasta el dispensador

Tiempo estimado total por bus (incluye maniobras)	
Min	10
Max	20
Promedio [min]	15

Información basada en el proyecto New Bus Fuel, Europa [32].

Con esta información, y utilizando el valor del tiempo promedio destinado a la carga de cada bus, se procedió a calcular el tiempo de recarga para flota completa de buses de acuerdo a la fase de expansión en curso y a la posible cantidad de dispensadores dispuestos en la estación, para lo cual se empleó la siguiente expresión matemática:

$$(3) \text{ Tiempo recarga}_{flota\ total} = \frac{n^{\circ} \text{ buses} \cdot \text{ tiempo carga por bus}}{n^{\circ} \text{ dispensadores}}$$

Tabla 11: Estimación de los tiempos considerados para la carga de la flota completa de buses, en base a la cantidad de dispensadores disponibles en la estación

Tiempo de recarga de la flota total según N° de dispensadores y buses [horas]					
Tamaño flota [n°buses]	Cantidad dispensadores				
	4	6	8	10	15
20	1,3	0,8	0,6	0,5	0,3

60	3,8	2,5	1,9	1,5	1,0
100	6,3	4,2	3,1	2,5	1,7
200	12,5	8,3	6,3	5,0	3,3
400	25,0	16,7	12,5	10,5	6,7

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados están muy por debajo de lo que implica la recarga de un BEB que, como se mencionó anteriormente, podrían tardar hasta 3-4 horas por cada uno dependiendo de la potencia del cargador utilizado. A modo de ejemplo, considerando la capacidad de carga que posee el electroterminal más grande de Latinoamérica inaugurado en Chile durante el mes de diciembre del año 2020 [46], sería posible cargar aproximadamente 100 BEB de manera simultánea, lo cual tomaría un total de 12 horas⁵ para la carga una flota de 400 vehículos, mientras que para el caso de los FCEB tomaría solo 1 hora cargar la misma cantidad de buses.

Por un lado, representa un beneficio logístico importante, pues, se reducen los tiempos de inactividad de los buses y es posible que retornen a sus recorridos operativos rápidamente. Por otro lado, conlleva a un beneficio económico para la administradora del sistema de buses, ya que no sería necesario contar varios buses de reemplazo que cubran la operación de aquel que se está cargando.

Infraestructura de abastecimiento

En cuanto al reabastecimiento de combustible de los vehículos, para efectos de este caso de estudio, se consideró una estación de recarga ubicada en el mismo terminal de buses (tipo on-site), en la que se produciría el combustible mediante electrólisis, utilizando energía eléctrica de la red. Por lo tanto, fue necesario calcular el requerimiento de insumos, electricidad y agua, necesarios para el proceso de producción de hidrógeno, en este caso hidrógeno verde.

Demanda de insumos para la producción de combustible

A continuación, se presenta en promedio la cantidad de insumos, electricidad y agua, requeridos para producir hidrógeno en base a la electrólisis del agua. En primer lugar, en la **Tabla 12** se presentan los valores nominales de consumo por parte del electrolizador y compresor, y la cantidad de agua. En segundo lugar, en la

Tabla 13 se presentan los requerimientos diarios y anuales para abastecer a la flota, en base al tamaño de esta. Lo anterior con el fin de poder obtener posteriormente un costo total estimado de producción del combustible.

⁵ Considerando que la capacidad de los cargadores del electroterminal es de 150 [kW] y que se pueden cargar de manera simultánea 110 buses aproximadamente.

Tabla 12: Requerimiento de electricidad y agua para la producción de hidrógeno por kilogramo.

Insumos para producción de H2 por electrólisis		
Electrolizador [kWh/kgH2]	Compresión [kWh/kgH2]	Agua [L/kgH2]
45,5	5	9,5
Total eléctrico [kWh/kgH2] = 50,5		

Información basada en un electrolizador tipo alcalino NEL Hydrogen AC150, y datos obtenidos por el proyecto New Bus Fuel en Europa.

En base a estos datos fue posible obtener el requerimiento de los insumos para la producción de hidrógeno necesaria para abastecer a la flota completa de buses, utilizando la siguiente expresión matemática:

$$(4) \text{ Requerimiento de insumo diario} = \text{demanda de H}_2 \text{ diaria} \cdot \text{requerimiento de insumo por kg}_{\text{H}_2}$$

Tabla 13: Requerimiento de electricidad y agua para la producción de hidrógeno por kilogramos consumidos según el tamaño de la flota de buses, diario y anual

REQUERIMIENTOS POR PRODUCCIÓN DIARIA TOTAL				REQUERIMIENTO POR PRODUCCIÓN ANUAL		
TAMAÑO FLOTA [N°BUSES]	Demanda diaria prom. [kgH ₂]	Agua prom. [L]	Electricidad prom [MWh]	Demanda anual [kgH ₂]	Consumo agua anual [L]	Consumo eléctrico anual [MWh]
20	450	4.275	23	164.250	1.513.350	8.295
60	1.350	12.825	68	492.750	4.540.050	24.884
100	2.250	21.375	114	821.250	7.566.750	41.473
200	4.500	42.750	227	1.642.500	15.133.500	82.946
400	9.000	85.500	455	3.285.000	30.267.000	165.893

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de requerimiento eléctrico están referidos al consumo como tal, por lo que para visualizar de forma más clara y traducirlo a un valor de potencia eléctrica instalada, se presentará un ejemplo comparativo entre la tecnología de BEB y FCEB. (Ver **Anexo 2**: Cálculo de potencia eléctrica instalada para el detalle del cálculo y las consideraciones del caso).

Tomando como referencia el electroterminal [47] inaugurado recientemente el año 2019 en Santiago, equipado con 37 cargadores que pueden operar de forma paralela y con una potencia instalada de **6 [MW]**, la mayor a nivel Latinoamericano hasta dicho momento, se realizó un cálculo análogo para abastecer a la misma cantidad de FCEB en relación a la energía equivalente de los BEB (entre consumo y autonomía). Se obtuvo que, para producir la misma energía equivalente demandada por 37 FCEB a través de electrólisis, la potencia eléctrica instalada debe ser de **1,9 [MW]**, es decir, **68%** menos de lo que se requiere para la tecnología eléctrica de batería.

Lo anterior tiene incidencia directa en los costos operacionales de la estación de repostaje, siendo otro factor relevante a considerar para adoptar tecnologías complementarias 100% eléctricas en un futuro cercano.

4.4. Diagnóstico económico asociado a la producción del combustible

Por último, como resultado económico se realizó la estimación del costo nivelado del hidrógeno considerando los insumos necesarios para la electrólisis junto con los costos *aguas-abajo* de la cadena de valor, es decir, todas las unidades dentro de la estación de abastecimiento desde el almacenamiento del combustible hasta el dispensador encargado de rellenar el estanque del bus, obteniendo un factor llamado *LCOH at dispensing*.

Para ello se tomaron en cuenta los siguientes parámetros para el cálculo final:

a) Costos relativos a la electricidad

El estudio se basó en el tipo de contrato “Green PPA”, el cual acuerda una cantidad de energía y una tarifa, entre el generador y el cliente por un plazo determinado. Recibe la denominación “green” ya que el generador cuenta con fuentes renovables no convencionales para su producción, o compra a otros generadores de energía limpia.

El precio de venta dependerá de cada acuerdo, y para efectos de este caso se utilizó un valor medio que entrega la Comisión Nacional de Energía (CNE) durante diferentes periodos, tomando el promedio entre 60 – 67 [\$/kWh] para clientes libres [48].

b) Costos relativos al agua

Para efectos de este estudio se tomó como referencia la tarifa de consumo de agua domiciliaria, que hasta fines del año 2019 el valor fue de $\approx 1,45 \text{ [USD/m}^3\text{]}$.⁶ Sin embargo, debido a los grandes volúmenes de agua que se utilizarían diariamente para la producción de hidrógeno verde en la estación en comparación al volumen de agua que comúnmente podrían consumir una residencia, lo más adecuado sería emplear agua industrial, ya sea por criterios medio ambientales y económicos. Para obtener una tarifa exacta del consumo de este tipo de agua se necesita contar con la ubicación específica de la planta, ya que en base a esto los valores fluctúan principalmente por la procedencia de las fuentes de abastecimiento, por esta razón se optó por considerar la tarifa domiciliaria. Cabe destacar que, aunque la elección de la tarifa de referencia implica diferentes costos a considerar, el costo total del agua es el que tiene menor incidencia en comparación con la electricidad.

c) Costo del combustible hasta el dispensador

Para el cálculo del LCOH de ambas fases del proyecto, en base a costos de inversión de la infraestructura de reabastecimiento que se manejan a nivel internacional, junto con los costos asociados al consumo de agua y energía eléctrica en el contexto de Chile. Es importante aclarar que este costo no solo considera lo relativo a la producción del combustible, sino que también contempla los gastos posteriores de infraestructura, hasta la unidad de dispensación para abastecer al bus.

Para su cálculo se deben utilizar la **Ecuación (1)**, obteniendo como resultado los siguientes valores de LCOH para las dos fases de desarrollo, los cuales consideran el costo de inversión y mantención de equipos en su cálculo (véase **Sección 0**)

$$\begin{aligned} LCOH_{fase1} &= 5,46 \text{ [€/kg } H_2\text{]} \\ LCOH_{fase2} &= 5,64 \text{ [€/kg } H_2\text{]} \end{aligned}$$

Si se hace una comparación con los costos que se manejan en Europa hasta la fecha, año 2020, se observan resultados similares al obtenido, pues, el costo de producción de hidrógeno por electrólisis rodea los $3 - 4 \text{ [€/kg } H_2\text{]}$ (considerando un precio de la electricidad de 70 [€/MWh]), y el precio de venta considerando los módulos intermedios de la estación hasta el dispensador, es cercano a 10

⁶ Superintendencia de Servicios Sanitarios, precio actualizado para Santiago 2019.

[€/kg H_2]. ⁷ Por lo tanto, el análisis realizado es un primer paso para tener en cuenta para futuros proyectos que pretendan instalarse en el país.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta simulación no es exacta y presenta gran variabilidad, dependiendo del contrato acordado entre los proveedores de energía y agua se podrían alcanzar tarifas más altas o bajas, asimismo, la tasa de descuento varía de acuerdo con el proyecto y la deuda de este. Junto con ello, los costos varían en base a las horas de utilización de los equipos de la estación, especialmente por el electrolizador, mientras menor sea la cantidad de horas usadas mayor será el costo y eso depende de los encargados de la instalación.

Otro factor que influye es el costo relativo a la certificación y los permisos necesarios para la ejecución de la estación de reabastecimiento no están considerados y dependen directamente del país en donde se pretenda desplegar el proyecto.

Además, cuando la producción de hidrógeno se realiza a mayor escala, se deben considerar una disminución de los costos de inversión y operación al optimizar la instalación inicial de la estación, lo cual no está contemplado, pudiendo alcanzar costos más bajos para la fase 2.

Los supuestos considerados para el cálculo final del LCOH se pueden encontrar en el **Anexo 0**.

La revisión de los principales actores de la electromovilidad y del hidrógeno en Chile permitió identificar las oportunidades de desarrollar estas tecnologías de movilidad limpia y cero emisiones, en base a los proyectos que se están impulsando desde el sector público, privado y la academia. Junto a ello, el análisis del estudio de caso para la ciudad de Santiago entregó los parámetros técnicos y operacionales necesarios para llevar a cabo la implementación de las celdas de combustible en los buses urbanos públicos. Además, se pudieron establecer los potenciales beneficios que podría entregar su uso como complemento a la tecnología eléctrica de baterías de litio, teniendo en cuenta la meta propuesta por el Ministerio de Transportes y Comunicación de contar con una flota de buses completamente eléctrica para el año 2040.

⁷ Valores referentes al proyecto JIVE en Europa con respecto a buses de celda de combustible, Jean Pierre Ponsard (CREST), 2019.

Capítulo 5: Proyección de la demanda de hidrógeno en transporte terrestre al año 2050

En este capítulo se realizó una estimación de la demanda de hidrógeno dirigido al sector de transporte terrestre, específicamente referido a buses de transporte público, para el año 2050 en la ciudad de Santiago de Chile. Este análisis se trabajó en base a la proyección de crecimiento de la población en la capital efectuando una relación de proporcionalidad directa entre la cantidad de habitantes de la zona y el número de buses urbanos destinados al transporte público, asumiendo que a partir del año 2040 todos los vehículos de este rubro serían eléctricos y que un porcentaje de ellos se basaría en baterías eléctricas mientras que el resto sería propulsado por celdas de combustible.

5.1. Cantidad de hidrógeno demandado para la flota futura de FCEB

De acuerdo a la relación de crecimiento entre la población de Santiago y los buses urbanos de transporte público, se obtuvo lo siguiente (véase **Tabla 14**):

Tabla 14: Datos utilizados para el cálculo de la proyección del tamaño de la flota de buses públicos al año 2050.

Año	Población de Santiago	N° buses de transporte público
2020	8.032.437 ⁸	6.700 ⁹
2050	9.261.400 ¹⁰	7.725

Fuente: Elaboración propia.

Luego, para estimar con exactitud la cantidad de hidrógeno demandado para el año 2050, se utilizó como supuesto que, del total de buses de transporte público en dicho año, el 40% corresponderá a FCEB y el 60% a BEB, tal como se muestra en la **Tabla 15**, de lo cual se obtiene el total de FCEB proyectados.

⁸ INE en base a las proyecciones realizadas en el último censo de Chile en el año 2017.

⁹ Ministerio de Transportes a través de La Tercera, febrero 2020.

¹⁰ Cálculo basado en la tasa de crecimiento de 15,3% estimada por el INE en el año 2018.

Tabla 15: Resultado obtenido para el número de FCEB estimados al año 2050 en la flota de transporte público de la ciudad de Santiago.

%FCEB estimados a 2050	n° FCEB estimados a 2050
40%	3.090

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, y en base al consumo promedio de combustible que fue calculado en el **Capítulo 4:** Estudio de caso para la ciudad de Santiago de Chile por 1 FCEB diariamente, el total de combustible requerido para suplir la demanda de la flota completa estimada para el año 2050 es $\approx 70 \left[\frac{\text{ton } H_2}{\text{día}} \right]$.

5.2. Diagnóstico de costos asociado a la demanda proyectada

La siguiente sección se referirá a grandes rasgos a los costos de suministro del combustible asociados a la demanda proyectada para el año 2050 que fue calculada de manera específica para su uso final en los buses de transporte público de la ciudad de Santiago.

Si bien ya se obtuvo un resultado en relación al costo del combustible en el **Capítulo 4:** Estudio de caso para la ciudad de Santiago de Chile, aquella estaba referida al caso de estudio específico de desplegar la flota de buses al día de hoy. Para este caso se revisará la proyección de los costos y el posible comportamiento que tendrían en base a los parámetros fundamentales de los cuales dependen.

Los factores que tienen mayor incidencia en este caso son:

- Tipo de suministro y cantidad de estaciones de recarga

En primer lugar, dependerá de la cantidad de estaciones de repostaje dispuestas en la ciudad para la alimentación de la flota completa de los buses urbanos públicos y, posteriormente, influirá la logística operacional que la operadora del sistema de transporte decida tener. Respecto al último punto, el terminal de buses podría abastecerse mediante la producción propia de hidrógeno en el mismo sitio, o podría comprar el combustible a una planta externa, para lo cual se contemplarían diferentes gastos en equipos empleados para la elaboración del combustible, o en el traslado de este hasta el terminal de buses.

- Costo de la energía eléctrica

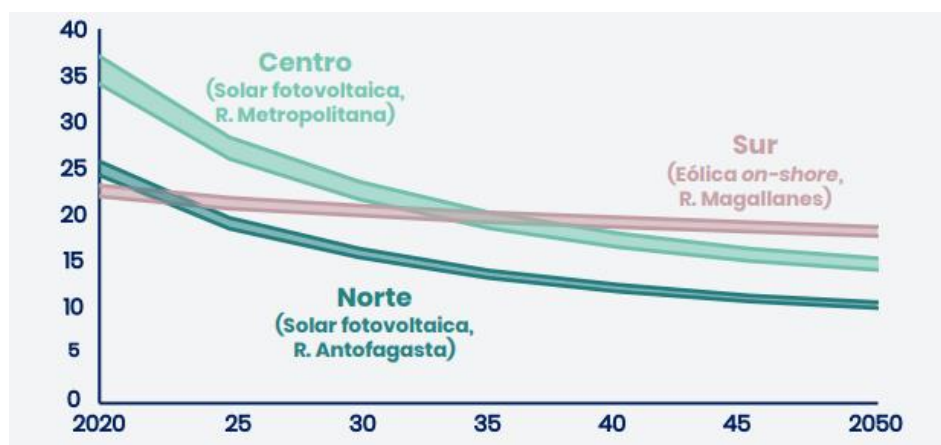
La producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua posee una gran dependencia del uso y costo de la electricidad, principalmente, y el agua. Por lo tanto, se establece una relación de

proporcionalidad directa entre el comportamiento de los costos de estos insumos con el costo final de producción del combustible.

Por ello, es fundamental revisar los factores que influirán, en el corto y largo plazo, en el comportamiento del combustible verde. En este aspecto, la

Figura 19 muestra la proyección del costo nivelado de electricidad renovable en Chile hasta el año 2050 dependiendo de la zona geográfica en cuestión. De aquí se observa una baja significativa del costo de producción de la energía eléctrica renovable para la zona centro y norte, casi de un 52%, mientras que para la zona sur se mantendrá relativamente estable. Por esta razón, se espera que la producción de hidrógeno verde manifieste una disminución similar en sus costos de producción, más aún si se trata acerca de proyectos de transporte público para la región Metropolitana.

Figura 19: Gráfico de la proyección del costo nivelado de electricidad renovable [USD/MWh] hasta el año 2050.



Fuente: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile, y McKinsey & Company [41].

- Avance en el despliegue tecnológico

El avance de la implementación de la tecnología del hidrógeno a nivel mundial y local es un factor fundamental en la reducción de costos a largo plazo, ya que el aumento en la demanda de equipos y dispositivos para la elaboración y manipulación del combustible implicará su fabricación masiva y la entrada de nuevos ofertantes. Esto permitirá el acceso a costos de obtención más competitivos en el mercado y, por ende, una disminución en los costos que envuelven la cadena de valor del suministro.

Adicionalmente a los factores recién expuestos, la firma de investigación Wood Mackenzie Ltd. prevé que el costo del hidrógeno verde caerá un 64% para el año 2040 en Chile, compitiendo con los precios

de producción de gas basado en combustibles fósiles, contribuyendo aún más con el panorama alentador en el despliegue de esta tecnología [49].

Si bien es difícil la proyección concreta de la demanda de hidrógeno para los buses de transporte público hasta el año 2050, los proyectos y metas planteadas desde el sector público en el país implican el aumento en el uso de la movilidad eléctrica para descarbonizar la matriz energética, lo cual tendrá que contemplar tecnologías más capaces técnicamente que las que ya se están empleando hasta el año 2020 en el caso local de Santiago. Además, el panorama alentador en la reducción de costos de generación eléctrica renovable en Chile es la base para lograr el mismo efecto en la tecnología del hidrógeno verde y las celdas de combustible.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1. Generales

A través de la metodología implementada en el trabajo de investigación, se pudo evaluar la factibilidad técnica del uso de hidrógeno como fuente de potencia en el transporte terrestre nacional, específicamente para buses urbanos públicos, demostrando que podría convertirse en una de las tecnologías protagonistas en la transición energética gracias a sus cualidades técnicas iguales o superiores a las que pueden entregar las fuentes fósiles, con el beneficio de no emitir ningún tipo de contaminante al ambiente.

Como eje central del documento, y con el objetivo de demostrar el potencial de las celdas de combustible en el transporte público urbano, se elaboró un estudio de caso para Santiago en el que se simuló el ingreso paulatino, por medio de dos fases de despliegue, de una flota de FCEB al Sistema de Movilidad Pública mediante la homologación de la flota actual de BEB que ya está operativa en la ciudad. Del análisis se obtuvieron los principales parámetros técnicos y operacionales a considerar por parte de la administradora los buses, siendo estos, una demanda diaria de combustible por parte de la flota final de $9.000 \left[\frac{kg_{H_2}}{día} \right]$, un tiempo promedio de recarga del almacenamiento interno de $15 \left[\frac{min}{bus} \right]$, los requerimientos eléctricos y de agua para la producción de hidrógeno verde dentro del mismo terminal de la flota equivalentes a $455 \left[\frac{MWh}{día} \right]$ y $85.500 \left[\frac{L_{agua}}{día} \right]$ respectivamente. Por último, se calculó el costo nivelado de hidrógeno contemplando toda la cadena de valor productiva hasta la zona de dispensación para el proyecto, resultando $LCOH_{fase1} = 5,46 \left[\frac{€}{kg_{H_2}} \right]$ y $LCOH_{fase2} = 5,64 \left[\frac{€}{kg_{H_2}} \right]$.

Con esto se pudo comprobar las ganancias operacionales que pueden entregar los FCEB y se pusieron en perspectiva con la flota actual de BEB de la ciudad, de lo cual es importante destacar que ambas tecnologías deben funcionar de manera complementaria, y no individual, aprovechando las cualidades que cada una puede ofrecer, para así lograr un sistema de movilidad pública 100% eléctrica y efectiva.

Finalmente, en base a la revisión de los resultados del trabajo y del contexto que rodea a la tecnología, se determinó que la industria del hidrógeno verde tendrá un panorama favorable para su despliegue a gran escala en todos los sectores industriales del territorio nacional, y que Chile podría ser el exportador líder del combustible a nivel mundial gracias a los abundantes recursos renovables que posee en su matriz energética.

6.2. Específicas

En base a la revisión del contexto internacional y local del uso de hidrógeno en el transporte, se observó que el interés por sus cualidades técnicas y medio ambientales se ha incrementado en los últimos años dada la situación climática que tiene en peligro la supervivencia del ecosistema natural de la Tierra, y se espera un futuro prometedor para la industria del combustible verde a nivel mundial.

Para llevar a cabo los objetivos planteados en el trabajo se implementó una metodología basada mayormente en el estudio y revisión bibliográfica internacional, debido a la poca experiencia que aún existe en Chile acerca del uso del hidrógeno como vector energético, sobre todo en las aplicaciones finales mediante la utilización de celdas de combustible en el transporte eléctrico.

Sumado a esto, se indagó en los principales actores impulsores de la electromovilidad y el uso del hidrógeno en todos los sectores industriales dentro del territorio nacional. A partir de lo cual, se pudieron identificar grandes oportunidades para el desarrollo de la tecnología en el país centradas en el reemplazo y complemento de la flota de buses urbanos del sistema de movilidad pública de Santiago. Teniendo en cuenta, además, la meta estipulada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de electrificar por completo este sector hacia el año 2040.

Adicionalmente, se profundizó en el funcionamiento de los FCEB y su infraestructura de recarga, lo que permitió visualizar el potencial de la tecnología aplicada a esta categoría vehicular, presentándose como una de las mejores opciones en cuanto a capacidad técnica, logística operacional e impacto medio ambiental. En este mismo punto, se examinaron las propiedades del hidrógeno, los riesgos que se le asocian y los sistemas de seguridad implementados actualmente a nivel global, con el fin de brindar confianza a la población y derribar posibles barreras que impidan el despliegue y desarrollo de la tecnología.

Posteriormente, mediante la simulación de la entrada de una flota de FCEB al sistema de transporte público de Santiago fue posible la estimación de los principales parámetros logísticos y operacionales para la puesta en marcha de un proyecto de esta índole. En este caso de estudio se evaluó la expansión de la flota de buses en dos grandes fases, de baja y gran escala, en un rango temporal de 5 años hasta obtener la misma cantidad de vehículos eléctricos de batería que posee hasta el año 2020 el Sistema

de Movilidad Pública RED, con el objeto de homologar el ingreso de tecnologías cero emisiones al transporte de la ciudad y comparar las demandas energéticas y operacionales.

De lo anterior se obtuvo que, durante el primer año de operación la demanda diaria de hidrógeno para abastecer a la flota de 20 de buses sería de 450 [kg H_2 /día], mientras que para el último año la demanda sería de 9.000 [kg H_2 /día] para el total de 400 buses. Para suplir dicha cantidad de combustible se calculó que el requerimiento de insumos utilizados en el proceso de electrólisis durante el primer y último año de despliegue sería de 4.275 [L/día] de agua y 23 [MWh] de electricidad, y 85.500 [L/día] de agua y 455 [MWh] electricidad respectivamente, siendo estos los parámetros que tendrían mayor incidencia en los costos operativos para la administradora del transporte.

Además, con el fin de obtener un diagnóstico preliminar en relación a los costos de producción del hidrógeno verde que abastecería a la flota de buses, se calculó un costo nivelado del combustible para ambas fases de expansión, resultando un valor de $LCOH = 5,46 \left[\frac{\text{€}}{\text{kg } H_2} \right]$ para la fase de baja escala, y $LCOH = 5,64 \left[\frac{\text{€}}{\text{kg } H_2} \right]$ para la fase que considera un despliegue a gran escala. Estos valores no difieren en gran medida de los que se manejan en proyectos similares en Europa en donde el costo de producir hidrógeno verde rodea los 3 o 4 $\left[\frac{\text{€}}{\text{kg } H_2} \right]$ ¹¹, considerando que el continente posee una experiencia superior con respecto a Chile en el uso de la tecnología.

Finalmente, el parámetro operacional que destacó y mostró mayor beneficio para el sistema en el caso de estudio fue el tiempo destinado a la recarga de combustible de los buses. Como se vio en la **Sección 4.3**, para un mismo tamaño de flota de BEB y FCEB, y una misma capacidad de carga simultánea, el proceso de carga de la flota completa de buses basados en baterías de litio podría tomar 12 horas mientras que para el caso de los buses basados en hidrógeno esto podría significar solo 1 hora, es decir, casi un 90% menos de tiempo. Por un lado, esto representa un beneficio logístico importante ya que se reducen los tiempos de inactividad de los buses y es posible que retornen a sus recorridos operativos rápidamente. Por otro lado, conlleva a un beneficio económico para la administradora del sistema de buses, ya que no sería necesario contar varios buses de reemplazo que cubran la operación de aquel que se está cargando.

Asimismo, el requerimiento eléctrico para la producción del combustible por electrólisis en el mismo terminal de buses podría implicar hasta un **68%** menos de potencia eléctrica que para el caso análogo de BEB, tal como se comprobó en el ejemplo de la **Sección 4.3**. Esto tiene incidencia directa en los costos operacionales de la estación de repostaje, siendo otro factor relevante a considerar para adoptar tecnologías complementarias 100% eléctricas en un futuro cercano.

¹¹ Considerando un costo de electricidad de 70 $\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$, tomando como referencia el proyecto JIVE en Europa con respecto a buses de celda de combustible, Jean Pierre Ponsard (CREST), 2019.

El estudio finalizó con la proyección de la demanda de hidrógeno verde destinado a los buses de transporte público para el año 2050, en el cual se estimó que el 40% de la flota total corresponderán a FCEB, obteniendo un resultado de $70 \left[\frac{\text{tonH}_2}{\text{día}} \right]$. Con esto, se estudió el comportamiento del costo relacionado al suministro del combustible previamente considerado, teniendo en cuenta que existe una relación directamente proporcional entre la variación de los costos de electricidad y los del hidrógeno producido por electrólisis de fuentes energéticas limpias. Dado que, el costo nivelado de la electricidad renovable tendrá una disminución cercana al 52% para la zona centro del país, se espera que el combustible verde presente el mismo panorama. Además, un aumento en el interés y despliegue de la tecnología en el país contribuirá aún más en la reducción de costos asociados a los equipos y dispositivos involucrados en la cadena de valor productiva del hidrógeno.

6.3. Recomendaciones

En primer lugar, se optó por la categoría vehicular de buses urbanos para el estudio debido al potencial que presenta la tecnología en el transporte de alto tonelaje y largo recorrido por sobre los demás, sumado a las oportunidades favorables que podrían presentarse desde el sector público del mercado y sus intenciones por descarbonizar la matriz energética. No obstante, se recomienda replicar el análisis hacia buses interurbanos y otras categorías vehiculares fuera del transporte por carretera, incluso al transporte marítimo o aéreo, los cuales son los mayores causantes de la contaminación atribuida al sector.

En segundo lugar, es relevante destacar que el trabajo se enfocó en la mejora tecnológica medio ambiental de los buses urbanos de la ciudad de Santiago, debido a la gran concentración poblacional y vehicular que influyen negativamente en la calidad del aire, sin embargo, se recomienda aplicar el análisis hacia las regiones del país. Ciudades del sur de Chile presentan una contaminación ambiental igual o peor que la que se vive en la capital causada, principalmente, por la calefacción residencial a leña, por lo que descarbonizar y mejorar el transporte público en esas zonas sería un plan de acción importante en la mitigación de daños de la crisis climática, y en el camino hacia la carbono neutralidad.

Adicionalmente, para mayor precisión en la proyección de la demanda de hidrógeno verde destinada a los buses de transporte público hacia el año 2050, se debería profundizar en la longitud exacta de cada línea de recorrido de la Red Metropolitana de Movilidad, ya que a partir de estos datos más concretos se puede estimar la proporción más óptima y recomendada de buses eléctricos que debiesen adoptar la tecnología de celdas de combustible en base a la logística operacional requerida, dentro del contexto de electrificar al 100% el sector.

Para futuro proyectos de buses urbanos en Santiago, es fundamental considerar fuentes de agua reutilizada, distinta de la destinada al consumo de la población, ya que para efectos del análisis económico relacionado a los insumos de producción de hidrógeno se contempló la tarifa correspondiente a consumo residencial. La inquietud anterior surge dada la situación ambiental y la escasez de agua potable en la zona centro, principalmente.

Finalmente, si bien una de las soluciones ante la problemática climática que se vive en el planeta es optar por medios de transporte sustentables como lo es la movilidad eléctrica en todas las categorías vehiculares, es fundamental apuntar hacia el cambio cultural de la sociedad. Es decir, es importante promover el uso de la micromovilidad como primera opción de acceso, seguido de medios de transporte público que optimicen el espacio disponible para los pasajeros y, como última alternativa, el uso de vehículos personales, ya que no logran utilizar de forma eficiente el espacio útil y son los principales causantes de la congestión vial. Para ello, es primordial que los esfuerzos gubernamentales se centren en mejorar el servicio brindado por la movilidad pública para los usuarios, de tal forma que sea la opción preferida por la ciudadanía antes de optar por un automóvil personal.

Referencias

- [1] H. Ritchie, 2020. [En línea]. Available: www.ourworldindata.org.
- [2] Germanwatch, NewClimate Institute & CAN, «Climate Change Performance Index,» 2020.
- [3] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Sitio web oficial del Ministerio de Energía,» Noviembre 2020. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- [4] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «"Aplicación de celdas de combustible a hidrógeno en buses de transporte público",» Santiago, 2020.
- [5] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile,» 2019.
- [6] GM Heritage Center, «Sitio web oficial de GM Heritage,» [En línea]. Available: <https://www.gmheritagecenter.com/>.
- [7] U.S Department of Energy, «Sitio web oficial de The U.S. Department of Energy (DOE) Hydrogen Program,» [En línea]. Available: <https://www.hydrogen.energy.gov/storage.html>.
- [8] IEA, «Tracking Transport,» 2020.
- [9] Hydrogen Council, «Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition, November,» 2017.
- [10] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition,» Abu Dhabi, 2018.
- [11] Deloitte China, «Powering the Future of Mobility,» 2020.
- [12] IPHE, «Sitio web oficial de International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy,» [En línea]. Available: <https://www.iphe.net/>.

- [13] CaFCP, «Sitio web oficial de California Fuel Cell Partnership,» [En línea]. Available: <https://cafcp.org/>.
- [14] FCHEA, «Sitio web oficial de Fuel Cell & Hydrogen Energy Association,» [En línea]. Available: <http://www.fchea.org/>.
- [15] FCH JU, «Sitio web oficial de Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking,» [En línea]. Available: <https://www.fch.europa.eu/>.
- [16] Market Research, «Automotive Fuel Cell Market by Component, Power Output and Region - Global Forecast,» 2020.
- [17] The World Bank Group, «Portal de conocimiento de The World Bank Group sobre cambio climático,» [En línea]. Available: <https://www.worldbank.org/>.
- [18] Universidad de Yale & Universidad de Columbia, «2018 Environmental Performance Index,» 2018.
- [19] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Energía 2050: Política energética de Chile,» 2015.
- [20] Ministerios de Energía, Medio Ambiente y Transporte y Telecomunicaciones, Gobierno de Chile, «Estrategia Nacional de Electromovilidad,» 2017.
- [21] H2 Chile, «Sitio web oficial de la Asociación chile de hidrógeno, "oportunidades país",» [En línea]. Available: <https://www.h2chile.cl/oportunidades-pais>.
- [22] Club de Innovación, «Webinar Mision Cavendish,» 2020.
- [23] Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile, «Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático,» 2018.
- [24] U.S Department of Energy, «Sitio oficial de U.S Department of Energy,» [En línea]. Available: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>.
- [25] E. E. L. & M. G. I. Michael Dolman, «Operators' guide to fuel cell bus deployment, JIVE & JIVE 2 Project,» 2019. [En línea]. Available: https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/JIVE_2_D2-1_Operators_Guide_to_FCB_Deployment_final.pdf.
- [26] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Plataforma web de electromovilidad,» [En línea]. Available: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/>.
- [27] F. Babir, PEM Fuel Cells: theory and practice, 2013.
- [28] CUTA, «Sitio web oficial de Canadian Urban Transit Association,» [En línea]. Available: <https://cutaactu.ca/en/news-media/other-electric-bus>.

- [29] College of Desert, «Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Module 6: Fuel Cell Engine Safety,» 2001.
- [30] New Flyer Industries Canada ULC, «Sitio web oficial de New Flyer Industries Canada: Brochure Xcelsior Charge H2,» [En línea]. Available: <https://www.newflyer.com/buses/xcelsior-chargeh2/>.
- [31] Solaris Bus & Coach sp. z o.o. , «Sitio web oficial de Solaris Bus & Coach: technical data Solaris Urbino 12 H2,» [En línea]. Available: <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/zero-emissions/hydrogen>.
- [32] D. M. F. D. O. S. N. W. S. W. Dr. Benjamin Reuter, «Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling,» http://newbusfuel.eu/wp-content/uploads/2015/09/NBF_GuidanceDoc_download.pdf, 2017.
- [33] Hydrogen Cars Now, «Hydrogen Fuel Tanks,» [En línea]. Available: <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hydrogen-fuel-tanks/>.
- [34] S. International, «Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles». Patente J2601_201407.
- [35] Air Products and Chemicals, Inc., «Carburos metálicos,» [En línea]. Available: <http://www.carburos.com/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.aspx>.
- [36] Rocky Mountain Institute, «Sitio web oficial de Rocky Mountain Institute: Run on Less with Hydrogen Fuel Cells,» [En línea]. Available: <https://rmi.org/run-on-less-with-hydrogen-fuel-cells/#:~:text=By%20contrast%2C%20hydrogen%20has%20an,12%E2%80%9314%20kWh%20per%20kg>.
- [37] H2 Chile, «Sitio web oficial de la Asociación Chilena de hidrógeno: Almacenamiento de hidrógeno,» [En línea]. Available: <https://www.h2chile.cl/copia-de-produccion-del-h2#:~:text=4,de%207.2%20MJ%2F>.
- [38] U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), «Hydrogen Tools Portal,» [En línea]. Available: <https://h2tools.org/tools>.
- [39] M. R. & D. W. D K Pritchard, «Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications: UK version,» 2009.
- [40] IEA, «Technology Collaboration Programme. Hydrogen as fuel,» [En línea]. Available: <https://www.ieafuelcell.com/index.php?id=33>.
- [41] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, «Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,» 2020.
- [42] Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile, «Sitio web oficial del Ministerio de Medio Ambiente,» [En línea]. Available: <https://mma.gob.cl/>.

- [43] Universidad Técnica Federico Santa María, «Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento,» 2020. [En línea]. Available: <https://dgiie.usm.cl/2020/06/12/usm-lidera-propuesta-para-crear-el-primer-centro-nacional-de-electromovilidad/>.
- [44] Red Metropolitana de Movilidad, «Presentación : Flota de buses eléctricos BYD Chile,» 2019. [En línea]. Available: <https://movelatam.org/wp-content/uploads/2019/09/20190830-EV-Buses-BYD-Chile.pdf>.
- [45] Red Metropolitana de Movilidad, «Información de recorridos de buses RED,» [En línea]. Available: <https://www.red.cl/>.
- [46] Portal Movilidad, «Portal Movilidad: "Electroterminal más grande del mundo fuera de China",» diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://portalmovilidad.com/copec-voltex-inaugura-la-electroterminal-mas-grande-del-mundo-fuera-de-china/>.
- [47] Revista Electricidad, «Sitio web Revista Electricidad: "Electroterminal con mayor potencia en Latinoamérica",» 2019. [En línea]. Available: <https://www.revistaei.cl/2019/03/28/se-pone-marcha-electroterminal-buses-mayor-potencia-latinoamerica/>.
- [48] Comisión Nacional de Energía (CNE), «Precio medio de mercado sistema eléctrico nacional,» 2020. [En línea]. Available: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/04/Precio_Medio_de_Mercado-04_20.pdf.
- [49] Revista Electricidad, «Sitio web de Revista Electricidad: "La carrera por el Hidrógeno verde en Chile y el mundo: Los esfuerzos para producir el combustible del futuro",» 2020. [En línea]. Available: <https://www.revistaei.cl/2020/10/14/la-carrera-por-el-hidrogeno-verde-en-chile-y-el-mundo-los-esfuerzos-para-producir-el-combustible-del-futuro/#>.
- [50] MMA, «Quinto reporte el Estado del Medio Ambiente,» 2019.
- [51] Our World in Data, «Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?,» 18 septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.

Anexos

En esta sección se encuentra la información y los datos empleados en los diferentes cálculos y análisis del estudio.

Anexo 1: Especificaciones técnicas de FCEB y BEB

En la **Tabla 16** se detallan las especificaciones técnicas de los buses de celdas de combustible y eléctricos de batería que se utilizaron como referencia en los análisis del estudio.

Tabla 16: Especificaciones técnicas de dos FCEB usualmente utilizados en proyectos de movilidad pública en Europa, y dos BEB que actualmente son parte del sistema de transporte público de Santiago.

Modelo bus	Solaris Urbino 12 H	Xcelsior Charge H2 New Flyer	BYD K9FE	YUTONG E12 LF
Tipo alimentación	Hidrógeno gaseoso comprimido	Hidrógeno gaseoso comprimido	Eléctrica de batería	Eléctrica de batería
Longitud [m]	12	12	12	12
Autonomía [km]	350	480	230 - 250	280
Tiempo de recarga	7 min.	6 - 10 min.	3-4 horas	2-3 horas
Consumo	0,08 - 0,09 [kg H_2 /km]	0,08 - 0,09 [kg H_2 /km]	1,4 - 1,5 [kWh/km]	1,4 - 1,5 [kWh/km]
Peso en vacío [kg]	13.100	13.800	14.400	14.450
Peso máximo [kg]	19.200	no inf.	19.700	19.500
Peso total/módulo celda o pack batería [kg]	244	256	n.inf	2500

Dimensiones módulo celdas (largo x ancho x alto) [cm]	113x87x51	113x87x51	n.a	n.a
Fuente energética	Ballard Fcvelocity-HD6 (60 kW)	Ballard Fcvelocity-HD85 (85 kW)	LiFePO4 batteries	LiFePO4 batteries
Motor eléctrico (potencia)	2 x 125 kW	160 kW	2 x 150 kW	215 kW
Máx. torque de salida [Nm]	n.i	1400	550 x2	2400
Capacidad pasajeros	80	82	80	85
Pack de baterías	29,2 kWh	100 kWh	324 kWh	324 kWh
Densidad energética batería kWh/kg	33 kWh/kg H_2	33 kWh/kg H_2	≈ 0,1	≈ 0,1
Almacenamiento combustible	36,8 kg H_2 @ 350 bar	37,5 kg H_2 @ 350 bar	n.a	n.a
Almacenamiento equivalente en batería [kWh]	700	700	n.a	n.a
Energía transportada [kWh]	1214	1238	324	324

Basado en las especificaciones técnicas oficiales de cada modelo de bus que están disponibles en los sitios web de cada fabricante.

Anexo 2: Cálculo de potencia eléctrica instalada

Para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para una flota de BEB de la **Sección 4.3** se consideró:

- Número de buses que pueden recargarse paralelamente: 37.
- Potencia del cargador por cada bus: 150 [kW].
- Autonomía de los buses: 240 [km]¹²

Luego, para homologar el cálculo de potencia eléctrica requerida para abastecer una flota de 37 FCEB mediante la producción de hidrógeno por electrolisis, se debe considerar que, los BEB pueden recorrer 240 [km], por tanto, para que cada FCEB recorra esa misma cantidad de distancia se requieren 20 [kg H_2] aproximadamente (considerando el consumo de combustible propuesto en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Con ello se obtiene que la cantidad total de hidrógeno para abastecer a la flota en un día es de 755 [kg].

¹² Considerando que los buses eléctricos corresponden al modelo K9FE BYD, utilizado actualmente en el sistema de transporte público de Chile. Fuente: BYD Motors Inc.

En base a las características del electrolizador de Hydrogenics HySTAT-60-10, y considerando el caso base planteado, se tiene:

- Consumo eléctrico por electrolizador: 57,8 [kWh/kg H₂]
- Flujo de hidrógeno que proporciona por hora: 5,4 [kg H₂/h]
- Potencia instalada requerida por cada electrolizador: 311,8 [kW]
- Considerando 6 electrolizadores funcionando paralelamente para cumplir con la producción de hidrógeno solicitada en 1 día.

Anexo 3: Consideraciones para el cálculo de LCOH

A continuación, se muestran los supuestos y consideraciones utilizadas para el cálculo de LCOH de la **Sección 4.3**.

3.1. Costos utilizados

Para el cálculo del costo nivelado del hidrógeno en el caso de estudio para Santiago se emplearon los costos capitales y operacionales, correspondientes a los equipos de la estación de recarga, dispuestos en la **Tabla 17**, **Tabla 18** y **Tabla 19**.

Tabla 17: Costos capitales de los equipos considerados para el análisis.

Costos de inversión por equipo	
Equipo	Costo
Electrolizador [€/ (kgH ₂ /día)]	3.700
Almacenamiento [€/ kgH ₂]	1.500
Compresor [€/kW]	6.000
Dispensador [€]	200.000

Datos basados en los proyectos europeos en el marco de New Bus Fuel Project.

Tabla 18: Costos operacionales variables considerados para el análisis, correspondiente al consumo de electricidad y agua utilizados en el proceso de electrólisis

Costos operacionales variables por kg H ₂	
Electricidad [€/MWh]	Agua [€/L]
71	0,0013

Fuente: CNE y SISS.

Tabla 19: Costos operacionales fijos considerados para el análisis, correspondiente a la mantención de los equipos

Capacidad diaria de la estación [kg H ₂ /día]	Costos operacionales fijos [€/año]
2.250	63.000
9.000	110.000

Fuente: Relación de costo/capacidad presentado por “Best practices in hydrogen fueling and maintenance facilities for transit agencies”, Calstart, 2016.

3.2. Supuestos para el análisis

Para el cálculo se tomaron en consideración los siguientes supuestos, los cuales podrían variar según el proyecto y que influyen directamente en el resultado final:

- Se calcularon 2 valores para LCOH, uno considerando el despliegue a baja escala de la fase 1, y otro para el despliegue a gran escala de la fase 2. En ambos casos se tomó como referencia la producción de objetivo final, **2.250 [kg H₂/día]** y **9.000 [kg H₂/día]** respectivamente.
- El tiempo considerado para el cálculo fue un promedio de la vida útil de los equipos de la estación, los cuales varían entre 10 y 20 años. Para la fase de baja escala se consideraron 20 años y para la fase de gran escala 15, esto debido a que la demanda de los equipos es mayor porque la capacidad productiva de la planta aumenta.
- Se consideró que el funcionamiento de la planta era de 24 horas al día, los 7 días de la semana.
- No se contemplaron los costos de reemplazo de los equipos debido a que el tiempo de vida utilizado fueron los años de vida útil de estos, sin necesidad de realizar un recambio.
- Se consideró un total de 5 dispensadores para la primera fase, y 5 más para la segunda. Esto es variable y depende del operador de buses, sin embargo, es el equipo de la estación que aporta menor porcentaje en los costos de inversión.
- Los costos de inversión de los equipos se extrajeron de los diferentes proyectos europeos que se encuentran en el marco de New Bus Fuel Project.
- Para el costo del consumo de agua se utilizó la tarifa para cliente de hogar, al no contar con el precio para clientes industriales.
- Se utilizó una tasa de descuento del **7%**, lo cual es variable y depende netamente de la deuda del consumidor.
- No está considerado el gasto relativo al tratamiento del agua.