

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Mecánica

Santiago – Chile



**“Estudio de factibilidad técnica en la utilización de
hidrógeno como fuente energética para
locomotoras de carga del Norte de Chile”**

Adibe Patricia Buhadla López

Memoria de Titulación para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía: Dr. Ing. Mauricio Osses

Profesor coreferente: Ing. Paula Bunster

2022

Agradecimientos

Esta tesis representa el término de una etapa muy simbólica y crucial en mi vida y quiero agradecer a distintas personas que formaron parte de ella, en primer lugar, a mis padres, Patricia y Adib, quienes me han apoyado de forma incondicional, dando siempre su mayor esfuerzo para hacer posible mi paso por la Universidad de principio a fin. Entregándome siempre mucho amor, cada uno a su manera y preocupación en cada detalle.

A mis hermanos, Adib, Nacira y Anita y mi cuñada Bessie, quienes a través de distintas manifestaciones cada uno a su estilo, demostraban su preocupación, apoyo y cariño siempre. También a mis sobrinos, Nacir, Adibito, Emir, Salvador, Rafaela y Leila, quienes sin saberlo me recargaban de energía siempre que los veía, a través de su inocencia y manifestaciones de cariño.

A mis amigas del colegio, por tantas risas, apoyo y contención desde el día uno que inicié esta etapa, al igual que aquellos amigos que fui conociendo en el camino de la Universidad, quienes fueron mi mayor compañía diaria, nos entendíamos y éramos refugio entre nosotros, sobre todo con los que compartíamos el sentimiento de estar fuera de nuestras casas. También a mis amigos de la vida, por estar siempre presentes a pesar de las distancias.

A mi profesor guía, Mauricio Osses, quien desde el día uno demostró mucho entusiasmo e interés por mi trabajo de tesis, lo cual me motivaba e impulsaba a realizarlo y terminarlo. A mi coreferente Paula Bunster por la gran oportunidad de realizar este trabajo formando parte de la empresa FCAB y a Germán Labarca Pizarro, por su gran disposición y buena voluntad en mi paso como memorista en la empresa.

Y por último a todos aquellos que formaron parte de este camino, ya sea, desde el comienzo, en el transcurso o al final de este, todos aportaron su granito de arena. Y además todos quienes se esfuerzan día a día por cumplir sus metas, para que sigan haciéndolo y perseverando por ello.

Resumen

En el presente documento se muestra el desarrollo de un estudio sobre la factibilidad técnica del hidrógeno verde, como fuente de combustible para locomotoras de carga del norte de Chile. Esto se llevó a cabo, en primer lugar, por medio de un estudio bibliográfico acerca del contexto existente a nivel nacional e internacional sobre de este tema, para hacer una revisión de los proyectos que ya están puestos en marcha como otros que se tienen pensado concretar en un futuro próximo, todo esto con el objetivo de contar con un respaldo que aclare si es realmente posible la opción de realizar la implementación de tal tecnología con éxito en el país, lo cual resultó que si, en base a lo revisado. Una vez que se contó con esa seguridad, se procedió a estudiar en profundidad las tecnologías en las que se aplica el hidrógeno verde y uno de sus derivados, el metanol verde, específicamente en locomotoras de carga, para conocer la estructura interna y principio de funcionamiento de cada una. Luego de contar con los conocimientos de base se procedió a idear un plan para la transformación de una locomotora diésel a una de hidrógeno y metanol, todo esto aplicado a una flota de locomotoras pertenecientes a la empresa FCAB, lugar donde se desarrolló este proyecto de investigación, sin embargo, el fin es generar una orientación general para cualquier locomotora que funcione a base de diésel y se quiera efectuar el cambio. Para lograr esto se realizaron diferentes análisis, a nivel técnico, energético, económico y de emisiones, siendo estos dos últimos factores proyectados al 2050, además de realizar una estimación sobre la demanda tanto de hidrógeno como de metanol, para lograr abastecer a todo el sistema ferroviario de la zona norte en caso de querer dar el paso a la transformación, puesto que de esta forma se tendrá una visión más amplia y generalizada acerca del tema, que ayude a tomar la mejor determinación.

Abstract

This document shows the development of a study on the technical feasibility of green hydrogen as a fuel source for freight locomotives in northern Chile. This took place in first place by means of a bibliographical study on the existing national and international context on this subject to make a review of the projects that are already in operation like others that are planned to materialize in the near future, all this with the aim of having a backup to clarify whether it is really possible to implement such technology successfully in the country which turned out to be based on the review. Once that security was available we studied deeply the technologies where the green hydrogen and green methanol were applied, specifically on freight locomotives to know the internal structure and operating principle of each one. After having the basic knowledge we proceeded to devise a plan for the transformation of a diesel locomotive to one of hydrogen and methanol all this applied to a fleet of locomotives belonging to the company FCAB, company where this research project was developed, however the purpose of this Project is to generate a general orientation for any diesel locomotive and wants to make the change. To achieve this different technical, energy, economic and emissions analyses were carried out, being these two last factors projected to 2050, also to make an estimation on the demand of hydrogen and methanol to supply the entire northern railway system in case of want to make the transition, because in this way we will have a broader and more generalized view on the issue which will help to make the best determination.

Glosario

- FCAB:** Ferrocarril Antofagasta Bolivia
- GEI:** Gases efecto invernadero
- PPM:** partículas por millón
- CO2:** Dióxido de carbono
- FCEV:** Fuel Cell Electric vehicle (vehículo eléctrico de celda de combustible)
- HFC:** Hydrogen Fuel Cell (celda de combustibles de hidrógeno)
- ASME:** American society of Mechanical Engineers (Asociación americana de ingenieros mecánicos)
- ISO:** International Organization of Standarization (Organización Internacional de Normalización)
- NFPA:** National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra Incendios)
- CGA:** Compressed gas Association (Asociación de Gas comprimido)
- IEC:** International electrotechnical comisión (Comisión electrotécnica Internacional)
- SAE:** Society of automotive engineers (Sociedad de Ingenieros del automóvil)
- ASTM:** American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de pruebas y materiales)
- OSHA:** The occupational safety and health administration (Administración de Seguridad y Salud en el trabajo)

Índice general

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract.....	iii
Glosario	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas.....	viii
Introducción.....	1
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
1 Estado del Arte.....	4
1.1 Contexto internacional acerca de la utilización de hidrógeno en transporte	4
1.2 Contexto nacional y oportunidades para implementación de hidrógeno en el transporte terrestre	7
1.3 Combustibles renovables	10
1.3.1 Hidrógeno.....	10
1.3.2 Metanol.....	19
1.4 Normativa y códigos regulatorios.....	23
1.4.1 Hidrógeno.....	23
1.4.2 Metanol.....	25
1.5 Especificaciones técnicas de locomotoras de carga.....	25
2 Metodología	29
2.1 Descripción general	29
2.2 Estudio bibliográfico.....	31

2.3 Identificación de actores principales del sistema de transporte ferroviario de carga en la zona norte de Chile	31
2.4 Análisis técnico	33
2.4.1 Análisis de una locomotora diésel.....	33
2.4.2 Análisis de una locomotora a hidrógeno	33
2.4.3 Aplicación del análisis al caso de estudio	34
2.5 Proyección	35
3 Análisis técnico del uso de hidrógeno y metanol verde en locomotoras de carga aplicado a la empresa FCAB.....	37
3.1 Análisis técnico para conversión de tren diésel a hidrógeno y metanol verde.....	37
3.2 Sistemas de seguridad y riesgo	43
3.2.1 Riesgos asociados al uso del combustible	43
3.2.2 Sistemas de seguridad	46
3.3 Estudio de caso para la empresa FCAB	50
4 Proyección de demanda al 2050, costos y emisiones relacionados al suministro de combustible en base a hidrógeno.....	55
4.1 Potencial demanda de hidrógeno y metanol al 2050.....	55
4.2 Diagnóstico de costos generales y emisiones.....	58
5 Conclusiones y recomendaciones	66
5.1 Conclusiones generales	66
5.2 Conclusiones específicas	67
5.2 Recomendaciones.....	69
6 Referencias.....	71

Índice de Figuras

Figura 1: Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.	1
Figura 2: Primer tren de carga con celdas de hidrógeno de origen chino.	6
Figura 3: Prototipo de tren indio con motor a base de metanol.....	7
Figura 4: Infografía de hidrógeno verde.....	12
Figura 5: Esquema resumen del principio de funcionamiento de un FCEV.	13
Figura 6: Diagrama descriptivo de la composición interna de un FCEV.....	14
Figura 7: Celda de combustible tipo PEM.	16
Figura 8: Proceso de obtención del metanol renovable.....	20
Figura 9: Esquema de conversión del vehículo Tesla Model Y, de eléctrico a híbrido.	22
Figura 10: Esquema de una locomotora diésel con sus componentes.....	26
Figura 11: Esquema resumen del principio de funcionamiento de una locomotora con celdas de combustible a hidrógeno.....	27
Figura 12: Diagrama de flujo de metodología implementada en el proyecto.	30
Figura 13: Esquema del modelo de locomotora con celdas de hidrógeno llamada Coradia Ilint y sus componentes.	37
Figura 14: Celda Modelo HyPM HD180 marca Hydrogenics..	40
Figura 15: Cilindros de hidrógeno de alta presión Hexagon Purus.....	40
Figura 16: Sistema de baterías Akasol.	40
Figura 17: Plano de locomotora GR-12 vista de costado y de arriba, transformada de diésel a hidrógeno, con una propuesta de distribución de equipos.	53
Figura 18: Proyección del precio del diésel al 2050.	58
Figura 19: Proyección del precio del hidrógeno verde al 2050.....	59
Figura 20: Proyección del precio del metanol verde al 2050.	59

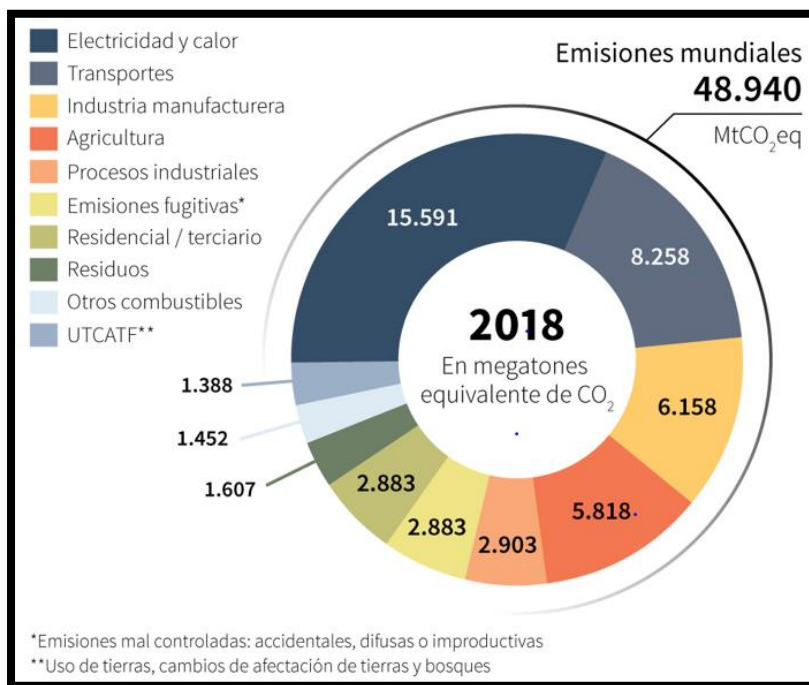
Índice de Tablas

Tabla 1: Medidas consideradas en los escenarios proyectados.	9
Tabla 2: Condiciones óptimas de presión, temperatura, humedad y proporción estequiométrica de gases reactantes para el funcionamiento de la celda de combustible tipo PEM.	17
Tabla 3: Normas y códigos internacionales acerca del almacenamiento y consumo de hidrógeno.	24
Tabla 4: Normas y códigos internacionales acerca del almacenamiento y consumo de metanol.	25
Tabla 5: Imagen, características y dimensiones de los elementos a implementar en tren diésel para transformarlo a uno de hidrógeno.	40
Tabla 6: Características y dimensiones de elementos que serán retirados de la locomotora diésel para transformar esta a hidrógeno.	41
Tabla 7: Datos del consumo energético y de combustible para todos los servicios ferroviarios junto con el promedio de cada uno.	51
Tabla 8: Datos del consumo anual de energía y combustible para cada servicio ferroviario junto con el total de cada uno.	56
Tabla 9: Combustible requerido estimado para todo el sistema ferroviario del norte de Chile.	57
Tabla 10: Costos totales anuales de implementación para cada tipo de combustible, proyectados al 2050.	60
Tabla 11: Cantidades de toneladas de CO ₂ emitidas al año por cada servicio ferroviario de FCAB.	62
Tabla 12: Emisiones generadas por servicios ferroviarios de la empresa FCAB.	64

Introducción

La Organización meteorológica mundial dio a conocer un informe donde se evidencia la enorme crisis climática que se está viviendo en la actualidad, puesto que allí se muestra que los niveles de dióxido de carbono(CO₂) en la atmósfera alcanzaron un nuevo récord en el 2020, alcanzando las 413,2 partes por millón(ppm), situación que no ocurría hace 3-5 millones de años, cuando la temperatura era de 2-3°C más cálida, el nivel del mar era de 10 a 20 metros mayor que ahora y la población era considerablemente menor, lo cual genera una gran preocupación e inquietud por hacer algo al respecto, si bien el CO₂ no es el único contaminante entre los gases de efecto invernadero(GEI), es el más abundante, por lo cual, esto es un dato representativo referente al tema. Respecto a lo mismo se tiene el siguiente gráfico donde se muestran las emisiones globales de GEI por sectores económicos, es importante recordar que estos gases son quienes regulan la temperatura media del planeta, sin embargo, un exceso de ellos hará que esta aumente al punto de modificar la vida en el planeta.

Figura 1: Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.



Fuente: [1]

Como se aprecia en la **Figura1**, el sector de transporte representa el 16,9% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono, si bien no es el que más genera, su aporte es el segundo más grande según este gráfico, por lo cual, impulsar un plan de descarbonización en este sector, será de gran aporte para la situación mundial, lo cual está directamente relacionado con el proyecto de investigación presentado en este informe, donde se quiere realizar un estudio de factibilidad técnica sobre la utilización de hidrógeno verde y uno de sus derivados, el metanol verde, como fuente energética para locomotoras de carga del norte de Chile, considerando que estas utilizan diésel, lo cual genera cierta cantidad de CO₂ por kilómetro recorrido, valor que va a variar para cada tipo de vehículo, a diferencia de los otros combustibles propuestos que son cero emisiones, es decir, no producen ningún tipo de contaminante, de hecho más bien el metanol utiliza CO₂, que puede ser captado del ambiente, en su proceso de producción, lo cual lo hace aún más conveniente a nivel medioambiental. Si bien el sistema ferroviario sólo representa una parte del transporte nacional, el hecho de investigar sobre este tipo de tecnologías verdes ayudará a evidenciar la realidad que se tiene con respecto al tema tanto nacional como internacionalmente y así conocer las herramientas con las que se cuenta para llegar a concretarlo en el país, considerando que es algo totalmente nuevo en el lugar. Todo esto se llevará a cabo por medio de una extensa investigación bibliográfica acerca del tema, el cual abarca el contexto nacional e internacional sobre la utilización de estos combustibles verdes y el potencial existente para llegar a ello o expandirse más aún. Además se realizó un estudio en detalle sobre ambos, desde el proceso productivo, principio de funcionamiento, junto con su manejo y almacenamiento, para finalmente realizar un análisis comparativo a nivel económico, técnico y por supuesto de emisiones, entre el combustible utilizado en la actualidad y los propuestos, todo esto con el objeto principal de armar una estrategia que oriente y aporte al plan de descarbonización, ya que, de esta forma se estará aportando al medioambiente y la crisis climática tan fuerte que se vive en la actualidad, lo cual fue la principal motivación para desarrollar este trabajo. Cabe mencionar también que existen empresas, dispuestas a invertir dinero para ser partícipes de aquello, como es el caso de FCAB, quienes tienen un plan de descarbonización en mente, del cual se formó parte por medio del desarrollo de esta investigación, como se muestra más adelante en detalle.

Objetivo General

- El objetivo general de esta tesis es estudiar la factibilidad técnica de la utilización de hidrógeno como fuente energética para locomotoras de carga del norte de Chile.

Objetivos Específicos

Para cumplir el objetivo general presentado, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Examinar el contexto nacional e internacional de la utilización de hidrógeno en el transporte público y privado.
- Identificar los actores principales del sistema de transporte ferroviario de carga en la zona norte de Chile.
- Efectuar un análisis energético y operacional para una flota de trenes en base a hidrógeno, que haya sido seleccionada como caso de estudio.
- Estimar la potencial demanda de hidrógeno para el transporte ferroviario de carga nacional del norte al año 2050.
- Realizar un diagnóstico de costos generales y emisiones, relacionados al suministro de combustible en base a hidrógeno.

1 Estado del Arte

1.1 Contexto internacional acerca de la utilización de hidrógeno en transporte

El hidrógeno es utilizado en diversas aplicaciones en el mundo, dentro de las cuales se encuentran las convencionales, como la industria química y refinería, las estacionarias, como los sistemas eléctricos y de respaldo, las móviles, como las baterías, también se tiene el uso de hidrógeno como gas y por último la aplicación de la cual se trata esta tesis, el transporte, específicamente el transporte de carga pesada. [2]

Al pasar los años estas aplicaciones han evolucionado y el transporte basado en hidrógeno es visto cada vez más como una potencial alternativa a los combustibles fósiles. En primera instancia, por los beneficios medioambientales que esto conlleva, ya que, este no emite gases tóxicos a la atmósfera durante su funcionamiento a diferencia de los otros y en segundo lugar el hidrógeno 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] [3]. Lo cual permite que, los vehículos con celdas de combustible cuenten con una autonomía igual o superior a la que actualmente presenta el transporte propulsado por la combustión de gasolina o diésel, junto con otras ventajas que se especifican más adelante.

Como se dijo anteriormente, para esta tesis sólo se va a utilizar la información acerca de las aplicaciones realizadas para transporte de carga pesada, como, barcos, camiones y trenes, por lo cual, si bien se sabe que existen diversas aplicaciones con hidrógeno en transporte de carga liviana, en esta oportunidad no se ahondará en ese tema, debido a que las condiciones de operación son diferentes en capacidades y autonomías requeridas. Estos últimos años diversos países han avanzado en el desarrollo de tecnologías del hidrógeno en distintas áreas, sin embargo, los que trabajan mayormente en proyectos con hidrógeno de este tipo son, Alemania, China, Italia, EEUU (California) y Reino Unido. [4][5]

Para el caso de los camiones de carretera, los primeros modelos se encuentran disponibles comercialmente en China, donde Nation Synergy ha firmado un contrato para la entrega de más de 3000 camiones de celdas de combustible y se espera que modelos adicionales del mismo tipo sean comercialmente disponibles en el próximo año, por las empresas Toyota, Nikola Motor y VDL. [4]

Por otro lado, para el caso de los barcos, se tienen prototipos para barcos de pasajeros con pilas de combustible funcionando en Francia, como es el caso del catamarán “Energy Observer”, el cual recientemente hizo una travesía desde Hawai(EEUU) hasta Nueva Caledonia(Francia) [6]. Y en Noruega, la empresa Viking Cruises planea construir el primer crucero del mundo a base de hidrógeno. [4]

Por último, para el caso de los trenes, en Europa se tiene un proyecto llamado FCH2RAIL (Fuel cell hybrid powerpack for rail applications), el cual consiste en desarrollar y construir una unidad de potencia híbrida de celdas de combustible, para ser aplicado en distintos servicios ferroviarios e incluso para el reequipamiento de trenes eléctricos y diésel existentes. En dicho proyecto participan países como Portugal, España, Bélgica y Alemania. [7] De hecho, existe un trabajo de investigación realizado por un estudiante de la Universidad Politécnica de Madrid, sobre la tracción ferroviaria con base de hidrógeno para las prestaciones de la red convencional española, donde se muestra que dicha conversión de diésel a hidrógeno, si es posible de realizar en una locomotora. [8] Sin ir más lejos en Alemania se encuentra el Coradia iLint, por la empresa Alstom, el primer tren de pasajeros del mundo que funciona con una celda de combustible de hidrógeno que genera energía eléctrica para la propulsión. Este tren completamente libre de emisiones es silencioso y solo emite vapor de agua. Además, se completaron con éxito las pruebas, que partieron el 2018 con los dos primeros trenes de este modelo, por lo cual, a partir del 2022, catorce trenes Coradia iLint propulsados por hidrógeno sustituirán a las actuales unidades diésel lo que confirma la fiabilidad de las pilas de combustible en operaciones diarias con pasajeros. [9] Más adelante se menciona en detalle la información técnica acerca de este tren, junto con su imagen, puesto que, será utilizado como referencia para el proyecto.

También en China, hay un tranvía funcionando desde el 2017, por la empresa China South Rail Corporation(CSR) la cual ahora se fusionó con China CNR y se formó CRRC, quienes en conjunto con State Power Investment Corporation (SPIC), construyeron la primera locomotora de carga híbrida, entre pila de combustible de hidrógeno y una batería de litio de alta potencia, la cual alcanza una velocidad de 80 km/h y una autonomía de 24 horas, pensado como un tren de carga pesada, para transporte de mercancía, puesto que, considera una capacidad de tracción de hasta 5000 toneladas y una potencia continua de 700 KW. [10] A continuación, se muestra una imagen de dicha locomotora.

Figura 2: Primer tren de carga con celdas de hidrógeno de origen chino.



Fuente: [10]

Además, en otros países como India, el Instituto Indio de tecnología de Kanpur en conjunto con los ferrocarriles indios están desarrollando un proyecto para que, en un futuro cercano, estén en marcha trenes a base de biometanol, por medio de la construcción de motores para locomotoras que funcionen con dicho combustible y serán un derivado de los actuales motores de locomotora diésel de 16 cilindros. Cabe mencionar que dicho combustible es un derivado del hidrógeno verde, por lo tanto, esta sería otra de las aplicaciones que se le da a este gas en el área del transporte de carga pesada y formará parte también de esta investigación [11]. A continuación, se muestra la imagen del prototipo para esta locomotora.

Figura 3: Prototipo de tren indio con motor a base de metanol.



Fuente: [11]

Por lo tanto, bajo estos argumentos se puede inferir que, si es posible desarrollar transporte impulsado por hidrógeno, tanto para implementarlo en la tecnología de celdas de combustible como en la producción de metano, siendo este considerado como el combustible del futuro, ya que, mundialmente muchos países pretenden llegar a implementarlo y lo están viendo como un objetivo importante de lograr en un futuro próximo.

1.2 Contexto nacional y oportunidades para implementación de hidrógeno en el transporte terrestre

Para el 2030 se proyecta una demanda mundial de 87,2 millones de toneladas de hidrógeno, según la Agencia Internacional de Energía (IEA) y siendo Chile un país rico en energías renovables, contando con un potencial energético de más de 1800 GW, el cual equivale a 70 veces la demanda del país, lo convierte en potencia en este tema. Los sectores solares y eólicos están madurando aceleradamente, puesto que, en 6 años, se ha quintuplicado su capacidad de generación de esas fuentes y se proyecta que, al 2030, hasta el 70% de su

matriz eléctrica sea renovable, habiendo lugares estratégicos como por ejemplo el Norte del país donde se encuentra la radiación más alta del planeta o bien en la zona extremo austral donde se tienen vientos con la misma energía en tierra que mar adentro. Lugares donde la producción de hidrógeno verde tendría el costo nivelado más bajo del mundo al 2030, el cual no incluye costos de compresión, transporte y distribución, los que varían según la aplicación final, según un estudio de la consultora McKinsey & Company [12]. Todo esto debido a que, para la producción del hidrógeno verde se utiliza energía eléctrica renovable. Además, la Agencia Internacional de Energía estableció que, Chile tiene un potencial de 160 [Mton] por año de producción de hidrógeno verde [12], lo cual vendría siendo otra de las ventajas que tiene el país con respecto a la producción de este combustible verde, ya que, esta cifra es casi el doble de la demanda mundial. Es por este motivo que también se le atribuye una ventaja al país para producir e-metanol, puesto que, como ya se dijo anteriormente, una de las bases de este combustible ecológico es el hidrógeno verde. Y en la actualidad existe una planta productora de este combustible verde llamada Haru Oni, ubicada en el extremo sur de Chile, que estaría iniciando su operación en el segundo semestre del presente año.

Por otro lado, Chile se ha comprometido con la acción climática de manera decidida y ambiciosa, por lo que, durante el 2020 actualizó su contribución determinada a nivel nacional y se comprometió a ser carbono-neutral al 2050, siendo el único país en vías de desarrollo en hacerlo y uno de los pocos del mundo en comenzar a tramitar una Ley Marco de cambio climático [12]. Por lo cual se ha diseñado una estrategia nacional de hidrógeno verde, la cual consiste en tres etapas principalmente. En la primera etapa, contemplada dentro de los años 2020-2025, se quiere activar la industria local y desarrollar la exportación mediante el despliegue de este combustible en seis aplicaciones prioritarias en Chile, dentro de las cuales se encuentra el transporte de carga pesada, como buses y camiones. Y por último en la segunda y tercera etapa, contempladas dentro de los años 2025-2030, y 2030 en adelante, respectivamente, se quiere escalar para conquistar mercados globales, levantando una industria de producción y exportación de amoniaco verde, además de acelerar el desarrollo de la exportación de hidrógeno, apuntando a ser un proveedor de energéticos limpios.

También la Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile actualizada en el 2020, tiene como principal misión acercarse cada vez más a los objetivos estipulados en el

Acuerdo de París, el cual fue establecido en la COP25 [13], dentro de los cuales se tiene como a largo plazo, “Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C”. Para lo cual se pide a las partes, en primer lugar, alcanzar un punto máximo o peak de emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) lo antes posible y, en segundo lugar, lograr un equilibrio entre emisiones y capturas después del año 2050. Por lo que, Chile se comprometió a tener niveles de emisiones absolutas anuales de hasta 95 $MtCO_{2eq}$ al 2030, lo que es un 23% menos, con respecto a la NDC de 2015. Y para lograr dicho propósito se tiene contemplado como uno de los planes el uso de hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovables para el transporte de carga, ya que, se cree que este tendrá un papel importante en el logro de la meta neutralidad, tomando en cuenta que las principales fuentes de carbono negro en Chile provienen del consumo de diésel para transporte terrestre, y además sería económicamente conveniente. Sin embargo, esta tecnología está en pleno desarrollo y se espera que sea comercialmente competitiva a partir de 2030. A continuación, se muestra los proyectos contemplados para este combustible. [14]

Tabla 1: Medidas consideradas en los escenarios proyectados.

Descripción		Escenario de referencia		Escenario de Carbono Neutralidad
Ámbito	Medida	Sector		
Hidrógeno	Transporte de carga	Energía	Sin medidas asociadas	71% en transporte de carga al 2050
	Usos motrices en industria y minería	Energía	Sin medidas asociadas	12% en usos motrices en industria y minería a 2050
	Uso térmico vía gasoductos	Energía	Sin medidas asociadas	7% en hogares y 2% en industria a 2050

Fuente: [14]

Por último, Chile formó una alianza energética con Alemania, con el objetivo de promover el uso de energías renovables y la eficiencia energética, para lo cual la Sociedad alemana de cooperación internacional, GIZ, brinda su apoyo [15]. Por lo que, se han fijado varios lineamientos, en los cuales se establecieron acciones y metas para realizar y cumplir de aquí al 2030 y 2050, como por ejemplo que, las energías renovables constituyan el 60% en el año 2035, y al menos un 70% de la generación eléctrica para el año 2050. También se tiene en mente la modificación del transporte, considerando que el sector transporte fue el segundo mayor consumidor de energía, con un 33% del consumo final total al año 2014. Y esta energía provino, casi en un 99%, de derivados del petróleo (principalmente diésel y gasolina asociados al transporte camionero). Para esto, se convocó a actores relevantes de todos los sectores de la sociedad, lo que incluyó al sector público, privado, sociedad civil y academia. [16]

En base a todo lo mencionado anteriormente en este ítem se puede inferir que, si bien no se ha mencionado a los trenes específicamente en los proyectos nacionales, el uso de hidrógeno verde en transportes de carga pesada si es considerado como un objetivo a nivel país y, además, podría considerarse como un proyecto viable, al menos desde el punto de vista de la producción de hidrógeno verde. Además de que la implementación de dicho combustible verde en el transporte tendría un rol importante para lograr las metas que se tienen como país a nivel energético y medioambiental.

1.3 Combustibles renovables

1.3.1 Hidrógeno

1.3.1.1 Características

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, y un gas no tóxico, no corrosivo, incoloro, inodoro y sin carbono, también es altamente inflamable y tiene una llama casi invisible, que puede provocar quemaduras accidentales, aparte de tener una energía de ignición muy reducida. Además, es el elemento más ligero, con una densidad de 0,0899 kg/m³ siendo 14 veces más liviano que el aire, lo que hace que se difunda más rápido que cualquier otro gas. Por otro lado, no es un gas de efecto invernadero y, en caso de que

ocurriera una gran fuga de este, su contribución secundaria al efecto invernadero se estima insignificante. Es un elemento abundante en el universo y en la Tierra, presente en el agua, los hidrocarburos y toda la materia orgánica, sin embargo, el hidrógeno rara vez se encuentra por sí solo, generalmente es parte de otra sustancia, como el agua y, por lo tanto, debe separarse del compuesto para estar disponible en su forma pura, lo que requiere un aporte de energía. Por lo tanto, se puede decir que es una energía secundaria, como la electricidad, también conocida como portadora de energía [17].

El hidrógeno molecular tiene la mayor densidad de energía en masa de cualquier componente químico, lo cual es una característica muy deseable en un combustible; pero es un gas a temperatura ambiente, por lo que requiere un gran volumen de almacenamiento y una elevada compresión u otra tecnología para su almacenaje. Cabe destacar que, en principio, todas las opciones de almacenamiento son adecuadas para vehículos ferroviarios, pero actualmente, se ha demostrado que la opción de almacenamiento más conveniente y realista es la de gas comprimido, puesto que, la baja densidad volumétrica del hidrógeno a presión atmosférica requiere de una compresión para lograr tamaños de almacenamiento aceptables, siendo las más comunes 200, 350 y 700 bar, esta última por ejemplo se emplea actualmente en la industria para autos ligeros y 350 bar para vehículos pesados como buses y ferrocarriles.[18]

Por otra parte, este elemento es el único combustible, aparte del amoníaco a base de hidrógeno, NH_3 , que no tiene huella de carbono cuando se emplea para la generación de energía. Y al ser una energía secundaria, el hidrógeno puede generarse a partir de muchas materias primas diferentes y, en consecuencia, reducir la dependencia del petróleo. En consecuencia, la utilización del hidrógeno como combustible, ofrece el potencial de reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero [19]. Ahora bien, es importante mencionar que esto último se cumple siempre y cuando se hable del hidrógeno verde, del cual se basa este proyecto, puesto que, para el hidrógeno se definen varios colores: gris, café, azul, verde, amarillo, turquesa, entre otros, y cada uno de ellos está asociado al método de obtención de este, su materia prima y si existen emisiones de dióxido de carbono asociadas a su producción. Por lo tanto, el hidrógeno verde se obtiene a través de un proceso en que no se emiten gases de efecto invernadero [20].

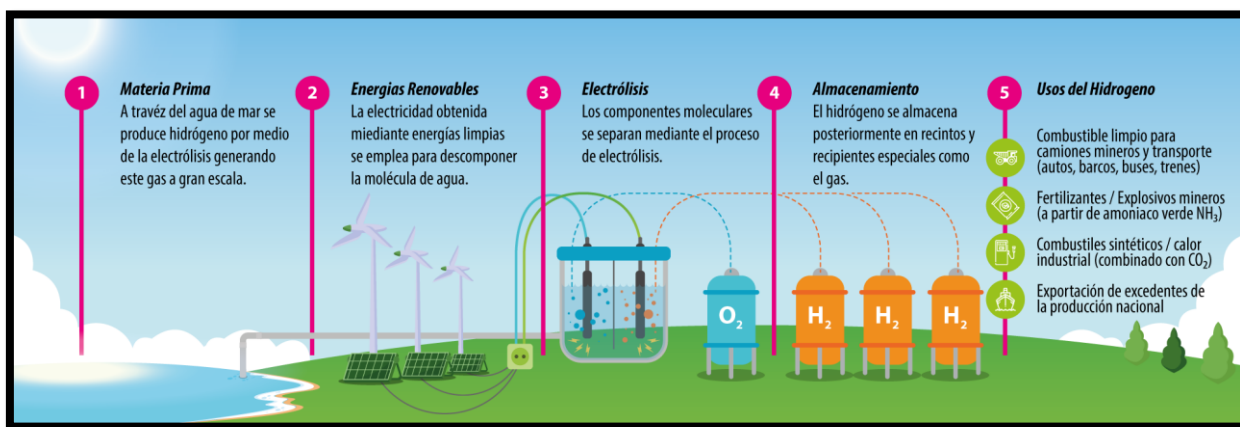
1.3.1.2 Suministro

Como se dijo anteriormente, es difícil encontrar hidrógeno en estado puro, por lo que se debe fabricar. Sin embargo, gracias a su versatilidad se puede producir a partir de una variedad de materias primas convencionales y alternativas, dentro de las cuales se tienen las que provienen de fuentes renovables y fósiles, pero en esta oportunidad sólo se van a considerar las primeras, para que se cumpla la condición del hidrógeno verde.

En dicho procedimiento de producción del hidrógeno verde, se somete el agua al proceso de electrólisis, es decir, se le aplica electricidad por medio de un electrolizador, dicho aparato consiste en dos electrodos conductores separados por una membrana a los cuales se les aplica un voltaje e intensidad elevados, para separar a esta en moléculas de oxígeno e hidrógeno. Ahora bien, lo importante de esto es que, dicha electricidad provenga de una fuente de energía renovable no convencional, como la energía eólica o solar. [20]

Luego de este proceso el hidrógeno pasa a ser almacenado en recipientes especiales y posteriormente puede ser convertido a líquido, puesto que, de esta forma es más fácil su transporte. Como se muestra a continuación en la **Figura 4** en un esquema gráfico del proceso.

Figura 4: Infografía de hidrógeno verde.



Fuente: [20]

Dentro de los usos que se le da al hidrógeno verde en el área del transporte se encuentran las celdas de combustible, las cuales son atractivas para aplicaciones ferroviarias, ya que, suministran energía eléctrica en corriente continua, perfecta para su almacenamiento

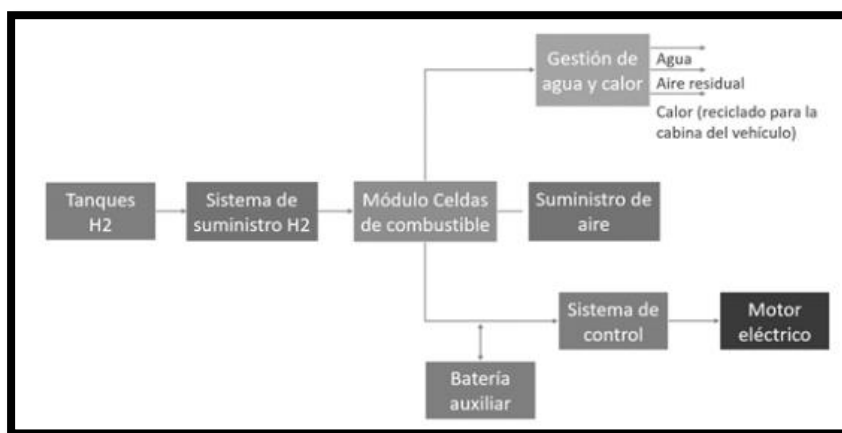
directo en baterías de ion de litio en caso de exceso de energía. Además, las membranas de intercambio de protones han sido utilizadas en el primer ferrocarril con tracción de hidrógeno comercial con total éxito. Actualmente, la principal desventaja de dicha tecnología es su mayor coste en comparación con los motores diésel; sin embargo, el popular HMU Coradia iLint acumula más de 50 pedidos, reflejando su gran competitividad en el mercado. [21]

Por otro lado, otra de las aplicaciones que se le da a este gas es el de producir e-metanol o biometanol, el cual sería un combustible cero emisiones y se obtiene luego de combinar CO₂ proveniente del aire con hidrógeno verde.

1.3.1.3 Principio de funcionamiento de un Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

El principio de funcionamiento del hidrógeno en la electromovilidad se trata básicamente de 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, todo esto ocurrido en la celda de combustible. A continuación, se puede ver en la **Figura 5** las principales etapas y/o módulos que se encuentran dentro de un vehículo de celdas de combustible (FCEV), y el recorrido que realizan los flujos energéticos. Siendo el módulo de celdas de combustible el dispositivo central de todo el sistema, a partir del cual se produce la energía necesaria para el abastecimiento del vehículo.

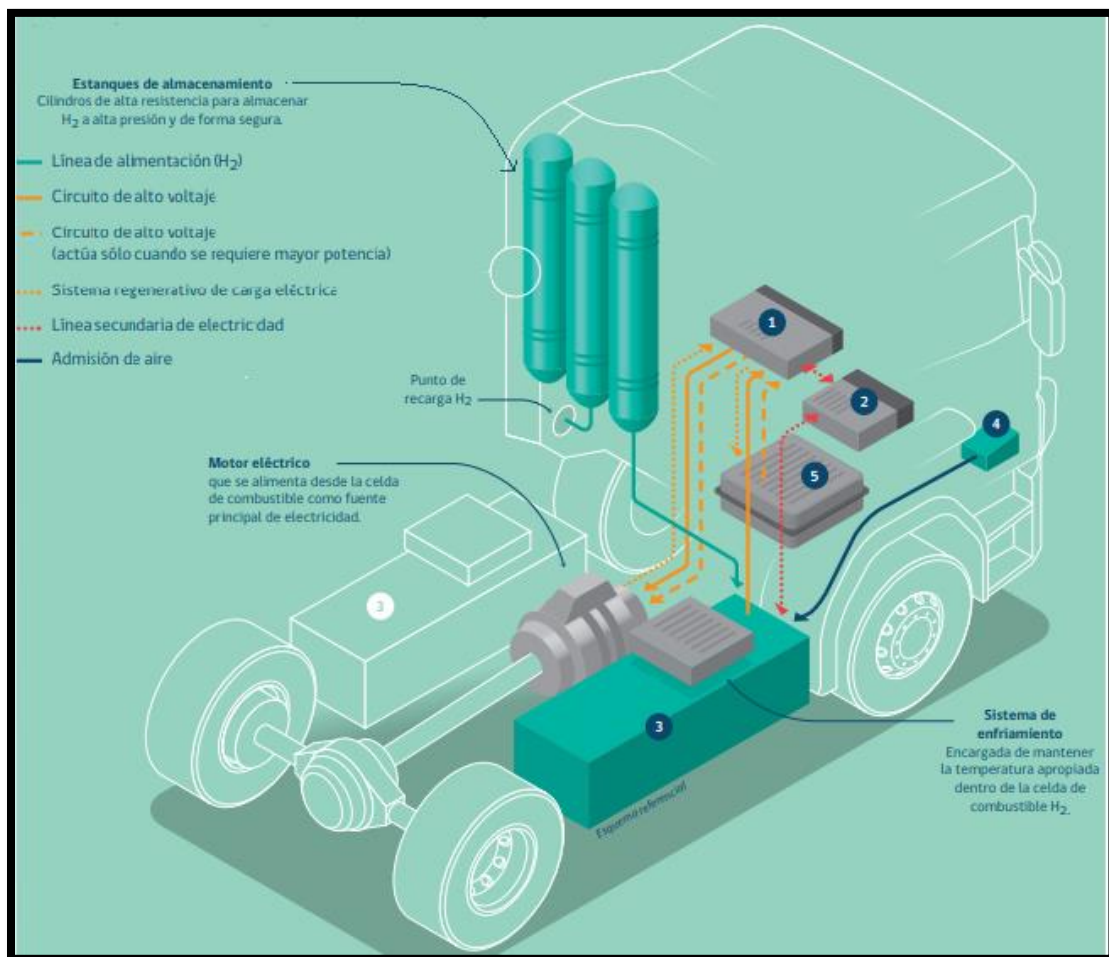
Figura 5: Esquema resumen del principio de funcionamiento de un FCEV.



Fuente: [22]

Esta tecnología ha sido aplicada tanto a vehículos de carga liviana como pesada, si bien la morfología de cada uno de ellos es bien diferente, tienen en común los siguientes módulos y/o subsistemas que son necesarios para poder propulsarse mediante la electricidad y las celdas de combustible. Los cuales se muestran a continuación en la **Figura 6**, usando un FCEV como ejemplo.

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



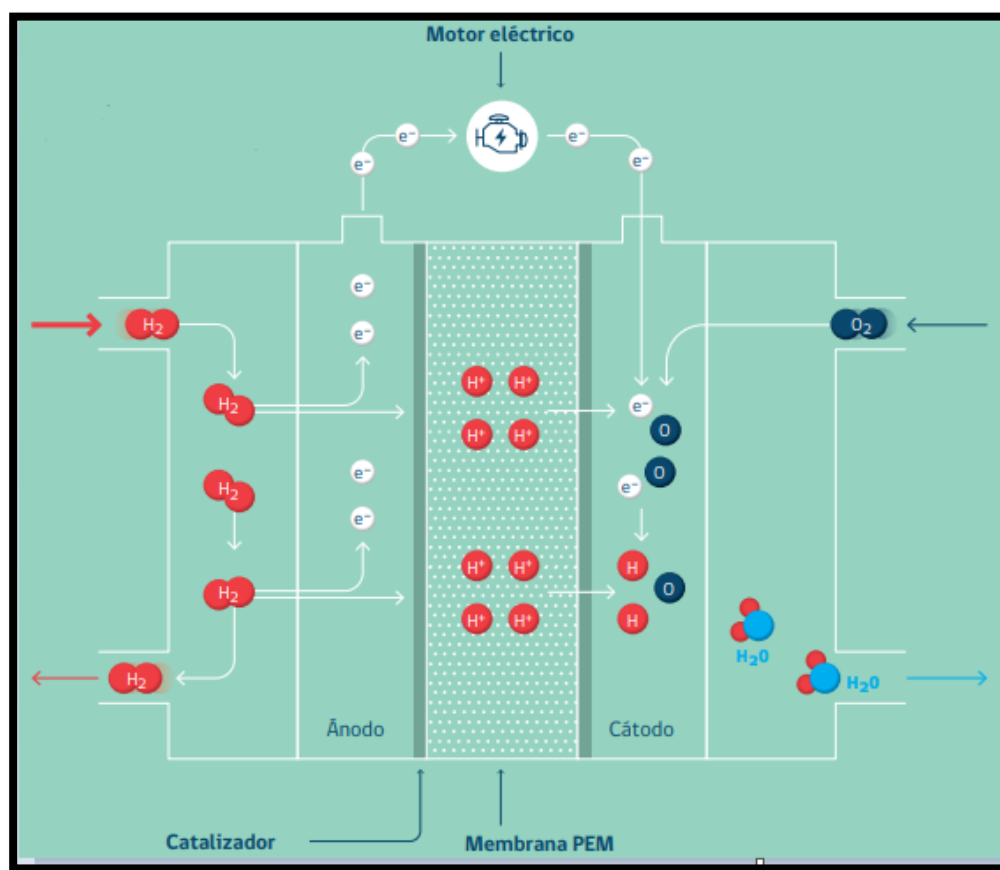
Fuente: [23]

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 hidrógeno y metanol verde en locomotoras de carga aplicado a la**

empresa FCAB, se revisará en mayor profundidad todos los sistemas que se encuentran en su interior.

En primer lugar, se tiene la celda de combustible, el cual es un dispositivo característico en la tecnología de los FCEV y forma parte del sistema propulsor, junto con el motor eléctrico, el banco de baterías auxiliar y el/los estanques de almacenamiento presurizado de hidrógeno. Existen diversos tipos de celdas, sin embargo, para aplicaciones en transporte se utiliza la celda tipo PEM, o membrana de intercambio protónica, en la cual ingresa hidrógeno gaseoso almacenado en los estanques, se traslada desde el ánodo hacia el cátodo, atravesando la membrana de intercambio protónica, y es en este último lugar donde se junta con el oxígeno proveniente del ambiente y se ocasiona la conversión electroquímica, la cual genera vapor de agua. Cabe mencionar que, esta membrana no deja pasar los electrones de las moléculas de hidrógeno, por lo cual, en el catalizador estas se separan y los electrones circulan por un circuito eléctrico externo, generando así una corriente eléctrica que energiza al motor del FCEV y a su vez libera calor. Además, es importante destacar que, este tipo de celda entrega energía al motor de manera continua, sin decaer el flujo eléctrico mientras se le suministre hidrógeno, es decir, no baja la potencia, aunque el estanque del gas se esté vaciando. A continuación, se muestra una imagen de la celda y su funcionamiento.

Figura 7: Celda de combustible tipo PEM.



Fuente: [23].

Es importante mencionar también que, para tener un óptimo funcionamiento en la celda de combustible se deben cumplir con ciertas condiciones de operación, dentro de las cuales se encuentran los niveles de presión y temperatura, la humedad de los gases reactantes y a su vez que estos cumplan una cierta proporción estequiométrica. Para lo cual se utilizan válvulas reguladoras de caudal y presión que se encargan de dirigir los flujos entrantes a la celda en las proporciones adecuadas. Dichas condiciones se especifican a continuación en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Condiciones óptimas de presión, temperatura, humedad y proporción estequiométrica de gases reactantes para el funcionamiento de 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 – 1,2 estequiométrico
Proporción O_2	1,2- 1,5 estequiométrico
Proporción aire	2 – 2,5 estequiométrico
Eficiencia	40-50%

Fuente: [24].

Ahora bien, en caso de que se tenga un aumento brusco en la potencia y este sea más elevado que lo que puede suministrar el módulo de celdas de combustible se tiene el banco de baterías auxiliar, que también recibe y almacena la electricidad proveniente del freno regenerativo. Cabe mencionar que este es uno de los principales dispositivos eléctricos de un FCEV, junto con el motor el cual es el encargado de propulsar y lograr la tracción del vehículo, y el conversor e inversor de corriente que cumplen la función de regular la intensidad de la corriente y convertirla de 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.

Para el caso de los estanques de almacenamiento presurizado de hidrógeno, que es otro de los componentes importantes del sistema de propulsión, se debe considerar que sean de un material especial para que logren cumplir la función de reservar este gas de forma segura y en las condiciones de presión adecuadas. Como se mencionó anteriormente en la **Sección 1.3.1.1: Hidrógeno-características**, según el tipo de vehículo 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, respectivamente. 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 vidrio/carbono [25]. Siendo el primero de ellos mencionado el que se debe utilizar para las locomotoras, sin embargo, más adelante se muestra que en la actualidad existe una empresa que ha desarrollado tanques tipo IV para implementarlo en presiones desde 250 hasta 900 [bar].

Por otro lado, se tienen otros sistemas necesarios para el óptimo funcionamiento del FCEV, como el sistema de aire y humidificación, el cual se encarga de captar, filtrar y suministrar el aire requerido por las celdas de combustible y además suministra el agua requerida para proporcionar cierto grado de humedad a los gases que reaccionan. Luego se tiene el sistema de enfriamiento, que se encarga de mantener todos los procesos y elementos del vehículo a una temperatura adecuada y para esto se utiliza un líquido refrigerante que se compone en un 50% de agua desionizada y otro 50% de etileno puro, el cual fluye por los diferentes circuitos que conectan los subsistemas y con ello absorbe y/o expulsa calor de los canales. Ahora bien, todo tipo de FCEV debe contar además, con un sistema que maneje el calor residual de los procesos internos de generación eléctrica y el ocasionado por el funcionamiento de los diferentes componentes que forman parte de él, para ello existen 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 reactantes que ingresan a la celda de combustible o para la calefacción de la cabina de pasajeros. De lo contrario, si no se requiere de esa energía calórica será expulsada hacia la atmósfera.

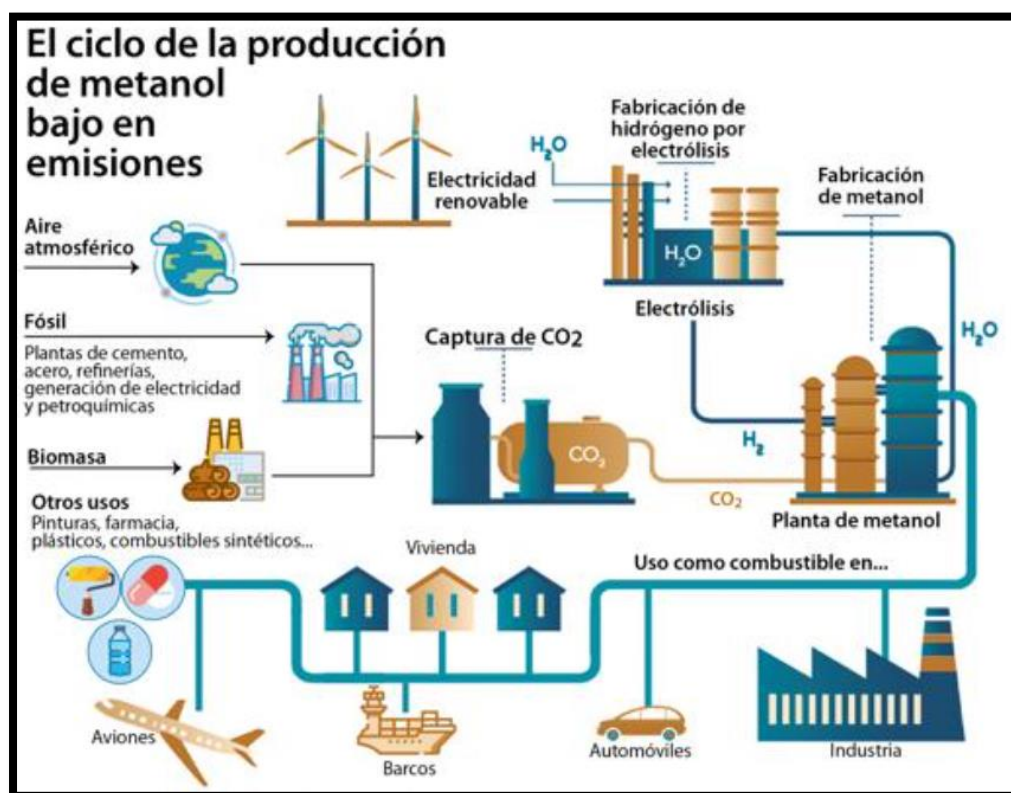
También está el sistema electrónico y de control, que cumple la función de monitorear, registrar y supervisar el estado de todos los procesos electroquímicos y componentes del vehículo, incluyendo los dispositivos eléctricos, suministrando la energía que cada uno de estos requiera desde las celdas de combustible y baterías, y, los de seguridad, que se ubican en lugares específicos del vehículo, como en los tanques de almacenamiento, en el módulo de celdas y en el motor eléctrico, además de gestionar las funciones estándares de un FCEV, como el encendido de luces, activación de calefacción y aire acondicionado. Todo esto para prevenir y advertir oportunamente posibles accidentes y/o fallas.

Por último, se tiene el sistema Heating-Ventilation-Aire conditioning (HVAC), el cual 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 principalmente 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. Sin embargo, para el caso de estudio, no es primordial utilizar este último sistema, considerando que son locomotoras de carga y no de transporte de pasajeros. [23]

1.3.2 Metanol

El metanol es una sustancia líquida que se utiliza en varios productos como plásticos, pinturas, cosméticos y combustibles, también es usado como un recurso energético en los sectores marino, automotriz y eléctrico, además de considerarse últimamente como un recurso de energía renovable emergente, de ahí deriva su clasificación en renovable y no renovable. Para el caso del metanol renovable, el que interesa para esta investigación, ya que, es un combustible cero emisiones, hay dos maneras de obtenerlo, si bien en ambas se utiliza dióxido de carbono, la forma de obtener este es la que varía, en una de ellas es a partir de biomasa, por lo cual se le atribuye el nombre de biometanol, donde las principales materias primas son residuos forestales o agrícolas, sólidos urbanos, aguas residuales, entre otras cosas. Y la otra forma es usando dióxido de carbono capturado del aire, por lo que se le atribuye el nombre de e-metanol, en ambos casos el carbono capturado debe ser mezclado con hidrógeno verde para formar el combustible finalmente. [26] Es por este motivo, además, que se va a considerar el uso de este combustible como otra alternativa de descarbonización para aplicarla en los trenes, ya que, se considera como un derivado del hidrógeno verde y también es cero emisiones, lo cual es el objetivo principal de reemplazar a los combustibles fósiles. A continuación, se muestra un esquema del proceso de generación del metanol renovable.

Figura 8: Proceso de obtención del metanol renovable.



Fuente: [26]

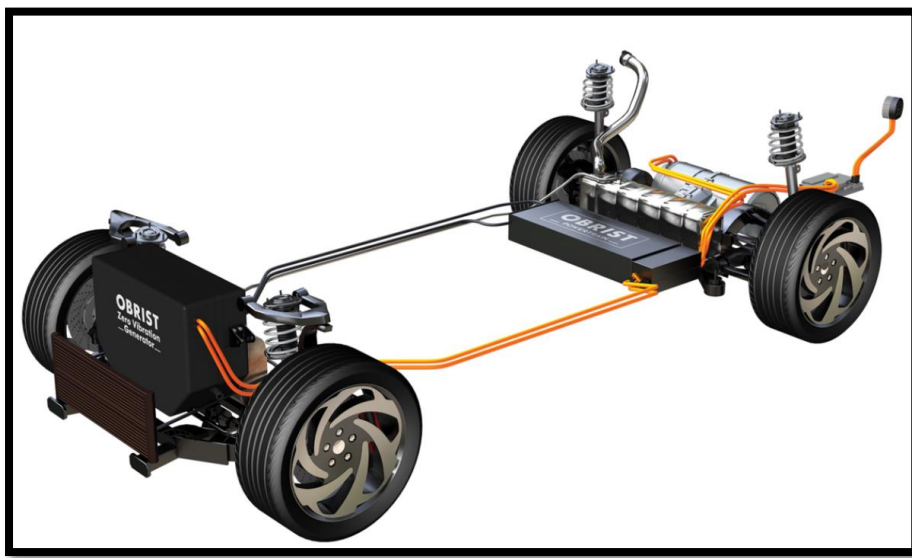
En cuanto a la aplicación de este combustible en el transporte, se puede mencionar que, los vehículos alimentados con metanol son similares a los convencionales puesto que, utilizan metanol o blending con combustibles tradicionales para alimentar el motor a combustión. Ahora bien, este combustible puede ser utilizado de forma autónoma tanto en motores de encendido por chispa (SI) como en motores de encendido por compresión (CI), modificando estos de manera conveniente. Sin embargo, para el caso de la mezcla que se menciona no se requiere de grandes modificaciones en el motor para alimentarlo.

Se conocen tres metodologías para la inyección de metanol en motores convencionales, una de ellas es a través del carburador donde ingresa una mezcla entre gasolina y metanol, para luego pasar a la cámara de combustión, esta sería la primera opción debido a que no se requiere ningún dispositivo adicional ni modificaciones en el sistema de suministro de combustible. Otra de ellas sería a través del puerto convencional de

combustible, para lo cual el metanol o la mezcla de este con gasolina se inyecta en el colector de admisión del motor para preparar una mezcla homogénea entre combustible y aire, antes de ingresar a la cámara de combustión, pudiendo ser aplicado esto tanto para motores de encendido por chispa como de encendido por compresión, para este último se necesitan dos inyectores; uno inyecta metanol en el orificio de admisión y el otro inyecta diésel en la cámara de combustión como es habitual pero con una cantidad reducida de gasóleo. Y, por último, se tiene la inyección directa, puesto que, tanto el metanol como el combustible convencional se inyectan directamente en la cámara de combustión, por lo cual para esto se requiere un inyector adicional para el ingreso del metanol, ya que, ingresan cada uno por separado lo cual va a aumentar el peso del sistema, sin embargo, este método da la opción de inyectar mayores concentraciones de metanol en los motores existentes.

Algunos ejemplos de aplicaciones del metanol que se conocen dentro del mundo del transporte, es en autos de carreras de resistencia, principalmente en la categoría Top Alcohol, y en la competencia de autos de USAC Indy, en las 500 millas, usando en estos casos mezcla de metanol con gasolina, pero en otras situaciones como en los autos Champcars, Monster Trucks y otros, se aplica este combustible de forma pura como regla general, puesto que el metanol no produce una nube opaca de humo, se quema cinco veces más lento que la gasolina y es mucho más fácil de extinguir.[27] Por otro lado, dentro del mundo automotriz se tiene también el HyperHybrid, el cual consiste en la conversión del modelo Tesla Model Y, un vehículo eléctrico, al cual se le instaló un motor de combustión impulsado por metanol, convirtiéndolo así en híbrido, todo esto efectuado por la compañía Obrist Powetrain, con el fin de extender la autonomía del vehículo eléctrico.[28] Cabe mencionar además que, los vehículos especializados basados en metanol pueden funcionar con un 25 a 30% más de eficiencia que los motores de gasolina tradicionales y con aproximadamente la misma eficiencia que los motores diésel. A continuación, se muestra una imagen de la conversión del vehículo Tesla Model Y, de eléctrico a híbrido, al cual se le suprimen la mayoría de las baterías y se instala en la parte delantera un generador alimentado por metanol.

Figura 9: Esquema de conversión del vehículo Tesla Model Y, de eléctrico a híbrido.



Fuente: [28]

Sin embargo, se deben tener ciertas consideraciones al momento de aplicar el metanol, como que el material presente en los motores sea compatible con este, es decir, especial, puesto que, el metanol ataca los materiales de aluminio y los corroe con facilidad, además de que es altamente inflamable e invisible, por lo cual se deben utilizar medidores de fuga. Por otro lado, este compuesto sufre fallos al momento del encendido o la combustión durante el arranque en frío debido a su calor latente de vaporización, 3,66 más alto que el de la gasolina, además de una velocidad de propagación de la llama más lenta, comparado con los combustibles convencionales, para lo cual, el uso de una bujía de incandescencia podría ayudar a superar este problema o bien agregar un 15% de gasolina. No obstante, el hecho de tener un alto calor de vaporización conduce a una disminución del estrés térmico de las partes del motor, es decir, una mayor eficiencia térmica y a un aumento del peso al llenar los cilindros con una nueva carga, lo que contribuye a un aumento de la potencia de salida del motor, ventajas que también se le atribuyen al alto octanaje que tiene este. Finalmente, es importante mencionar que, este combustible también tiene un calor de combustión bajo, por lo cual, se requiere el doble de metanol que de gasolina en una mezcla de aire-combustible, para generar la combustión. [29]

Ahora, en cuanto al almacenamiento de este combustible se debe tener en cuenta que este es higroscópico, lo que significa que absorberá el vapor de agua directamente de la atmósfera, por lo cual los contenedores utilizados para ello deben mantenerse herméticamente cerrados, puesto que, el agua diluye el valor del metanol y puede causar la separación de fases en las mezclas de metanol y gasolina. Si bien se debe tener las mismas disposiciones que para el almacenamiento de la gasolina, también se recomienda que los tanques estén conectados a tierra para evitar los peligros asociados con descargas de electricidad estática, además del control de la inflamación, por medio de una atmósfera de nitrógeno, gas natural o por designación de peligro con control de inflamación. [30]

1.4 Normativa y códigos regulatorios.

Al momento de implementar cualquier tipo de tecnología o industria es de suma importancia conocer la normativa y regulación que existe al respecto, todo esto con el fin de verificar que se encuentre bajo los márgenes de la ley. Como es el caso de los combustibles involucrados en este proyecto, tanto el hidrógeno como el metano, para los cuales existen normas y códigos a nivel internacional para fiscalizar el uso correcto de ellos y de esta forma otorgar la confianza necesaria a todos los posibles usuarios y operadores, considerando mayormente que esta es una tecnología poco conocida en el país, por ende, se debe tener mayor resguardo en este aspecto. En Chile la normativa regulatoria se está desarrollando para el hidrógeno, por ende, se utilizan las normas internacionales para poder avanzar en integrar esta tecnología a nuestra industria.

1.4.1 Hidrógeno

Dentro de las normas internacionales con respecto al hidrógeno, vigentes actualmente, se encuentran las siguientes.

Tabla 3: Normas y códigos internacionales acerca del almacenamiento y consumo de hidrógeno.

Norma/ Código	Alcance
ASME B31.12	Se aplica a tuberías y conductos de hidrógeno, tanto líquido como gaseoso.
ASME STP/PT-005	Proporciona recomendaciones acerca de factores de diseño para depósitos de hidrógeno de alta presión utilizados en el almacenamiento y transporte de este.
ISO 11114	Se refiere a la compatibilidad de materiales de los cilindros de gas transportables y las válvulas, con el contenido de gas, ya sea individual o mezcla de estos.
NFPA 2	Proporciona las consideraciones de seguridad con respecto a la generación, almacenamiento, manipulación y uso del hidrógeno gaseoso o líquido.
CGA C-6.4	Entrega métodos para una inspección visual externa de los contenedores de combustible de vehículos a base de gas natural e hidrógeno y sus instalaciones.
IEC 62282	Menciona la información requerida acerca de las celdas de combustible y sus aplicaciones, como requisitos de seguridad, construcción, operación, entre otros.
ISO 19880-1	Requisitos para las estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso.
ISO 17268	Define características de diseño, seguridad y funcionamiento de los dispositivos para el repostaje de hidrógeno gaseoso en vehículos terrestres.
ISO 19881	Requisitos para los contenedores de hidrógeno gaseoso para vehículos terrestres.
SAE J2719	Requisitos acerca de la calidad del combustible de hidrógeno para vehículos que utilizan celdas de combustible tipo PEM.
SAE J2579	Define requisitos para sistemas de combustible en vehículos de celdas de combustible.
SAE J2601	Establece y mantiene los límites del proceso de abastecimiento de combustible para garantizar la seguridad y el rendimiento de este.

Fuente: [31].

1.4.2 Metanol

Dentro de las normas internacionales vigentes, específicamente de Europa y Estados Unidos, que se aplican en la actualidad para el metanol, se encuentran las siguientes más generales. Cabe mencionar sin embargo que, muchas de estas normas no son específicamente referidas al metanol, si no, más bien, al manejo de una sustancia peligrosa y altamente inflamable tal como lo es este combustible.

Tabla 4: Normas y códigos internacionales acerca del almacenamiento y consumo de metanol.

Norma/ Código	Alcance
ISO 9001:2015	Sistemas de gestión de calidad.
NFPA 30	Requisitos acerca del almacenamiento del metanol para evitar accidentes.
ASTM E681	Describe un método de prueba estándar para determinar los límites de inflamabilidad.
OSHA 29 CFR 1910.119	Define criterios para la gestión de seguridad de los procesos de productos químicos altamente peligrosos.

Fuente: [32].

1.5 Especificaciones técnicas de locomotoras de carga

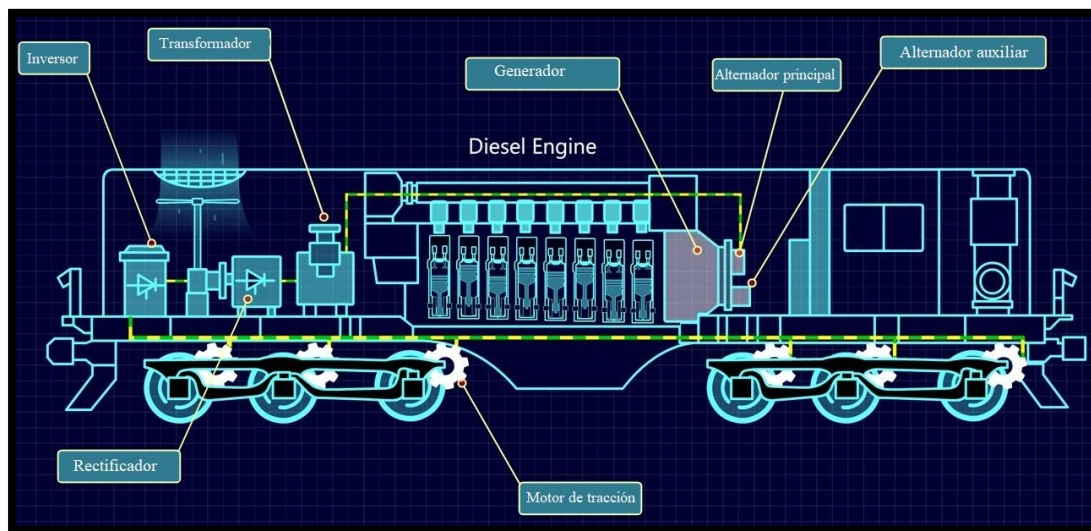
Las locomotoras diésel requieren de un sistema de accionamiento para arrancar, ya que, de lo contrario no logra desarrollar toda la potencia necesaria para ello. Para esto se utilizan tres métodos, mecánico, hidráulico o eléctrico. En esta ocasión sólo se explicará el último, puesto que, es el método que utilizan en su mayoría estas locomotoras y en particular las que se encuentran en el sistema ferroviario de Chile, las cuales tienen una estructura interna formada por un motor diésel de combustión interna que mueve un generador eléctrico para proporcionar la energía necesaria y de esta forma mover los motores eléctricos, conocidos como motores de tracción, quienes son los encargados finalmente de entregar el movimiento a la máquina, por medio de piñones que conectan a las ruedas, siendo esta la fuerza de tracción. Por lo general se tiene un motor de tracción anclado por engranaje a cada

uno de los ejes del vehículo, por consiguiente, se cuenta con cuatro a seis de ellos por locomotora. Gracias a esto se tiene una potencia instalada tres veces más grande que la potencia nominal, puesto que se consideran las potencias de cada uno de los elementos mencionados anteriormente lo cual desencadena que este tipo de locomotoras tengan un alto peso y costo, al compararse con las eléctricas o hidráulicas.

Otra de las tareas importantes del motor diésel es proporcionar energía para el funcionamiento de los equipos auxiliares, tales como, bombas, ventiladores, compresores del equipo de freno, carga de batería, entre otros. Y a su vez estos equipos reciben energía eléctrica por medio de generadores auxiliares, los cuales dependiendo del caso pueden ser uno o dos, el primero tendría la función de generar energía eléctrica a tensión constante para alimentar los circuitos de baterías, iluminación y motores, y el segundo generar a tensión variable y de magnitud adecuada para regular la potencia.

Por último, con respecto al almacenamiento de energía, esta puede efectuarse por medio de baterías eléctricas, las que pueden recargarse con el generador o bien reemplazarla por otra cargada en un lugar preestablecido. O por supercondensadores los cuales pueden ser recargados en poco tiempo en cada parada. [33] A continuación se muestra un esquema de una locomotora diésel con sus partes.

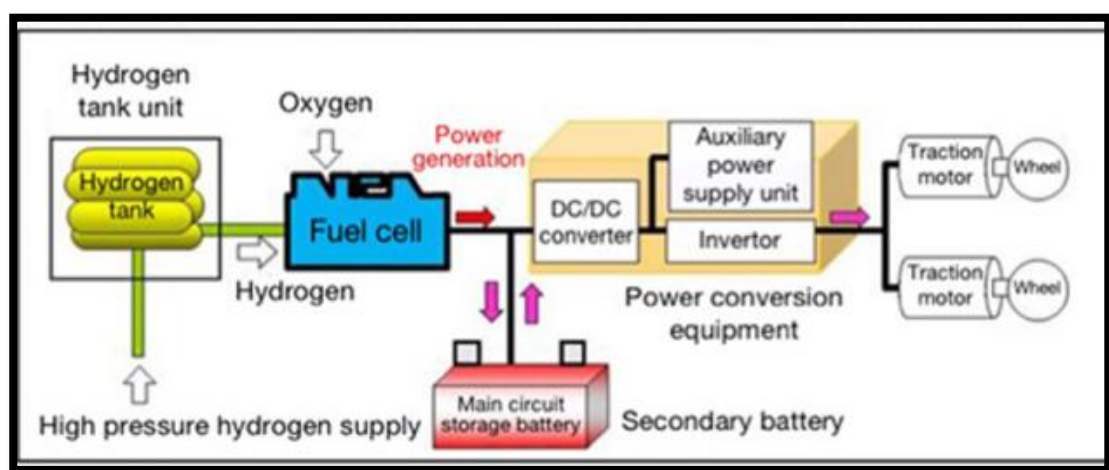
Figura 10: Esquema de una locomotora diésel con sus componentes.



Fuente: [34]

En cuanto a las locomotoras a base de hidrógeno, o bien que utilicen la tecnología de celdas de combustible, se puede decir que, tienen un principio de funcionamiento muy similar a las locomotoras diésel, ya que, la única modificación será sacar el motor diésel y el generador para reemplazarlos por una celda de combustible, estanques de hidrógeno para alimentar a esta y una batería, funcionando el resto del sistema de la misma forma. Es importante mencionar que, el principio de funcionamiento de estas locomotoras es como el de cualquier FCEV, por lo cual, para entender este en detalle se debe revisar la **sección 1.3.1.3 Principio de funcionamiento de un FCEV**, esto es hablando de forma general y considerando los componentes principales del vehículo, ya que, cada uno tiene sistemas complementarios propios acordes a sus requerimientos de uso. Por consiguiente, volviendo a las locomotoras de hidrógeno, se tiene la misma descripción que se dio para las locomotoras diésel con respecto a su funcionamiento, pero en este caso el encargado de generar la energía eléctrica será la celda de combustible y en caso de necesitar la batería puede proporcionarla, además. A continuación, se muestra un esquema con el principio de funcionamiento de este tipo de locomotoras.

Figura 11: Esquema resumen del principio de funcionamiento de una locomotora con celdas de combustible a hidrógeno.



Fuente: [35]

Finalmente, al referirnos a locomotoras con base de metanol se puede decir que estas funcionan igual que una locomotora diésel, sin embargo se debe realizar una modificación al motor, aunque si bien aún está en estudio este modelo de locomotora, estos reflejan que lo más óptimo sería realizar una inyección directa, método que fue explicado la **sección 1.3.2 Metanol**, por lo cual se debe cambiar los inyectores e instalar una bomba para aumentar la potencia, puesto que el metanol sólo entrega la mitad de potencia del diésel por sí sólo.

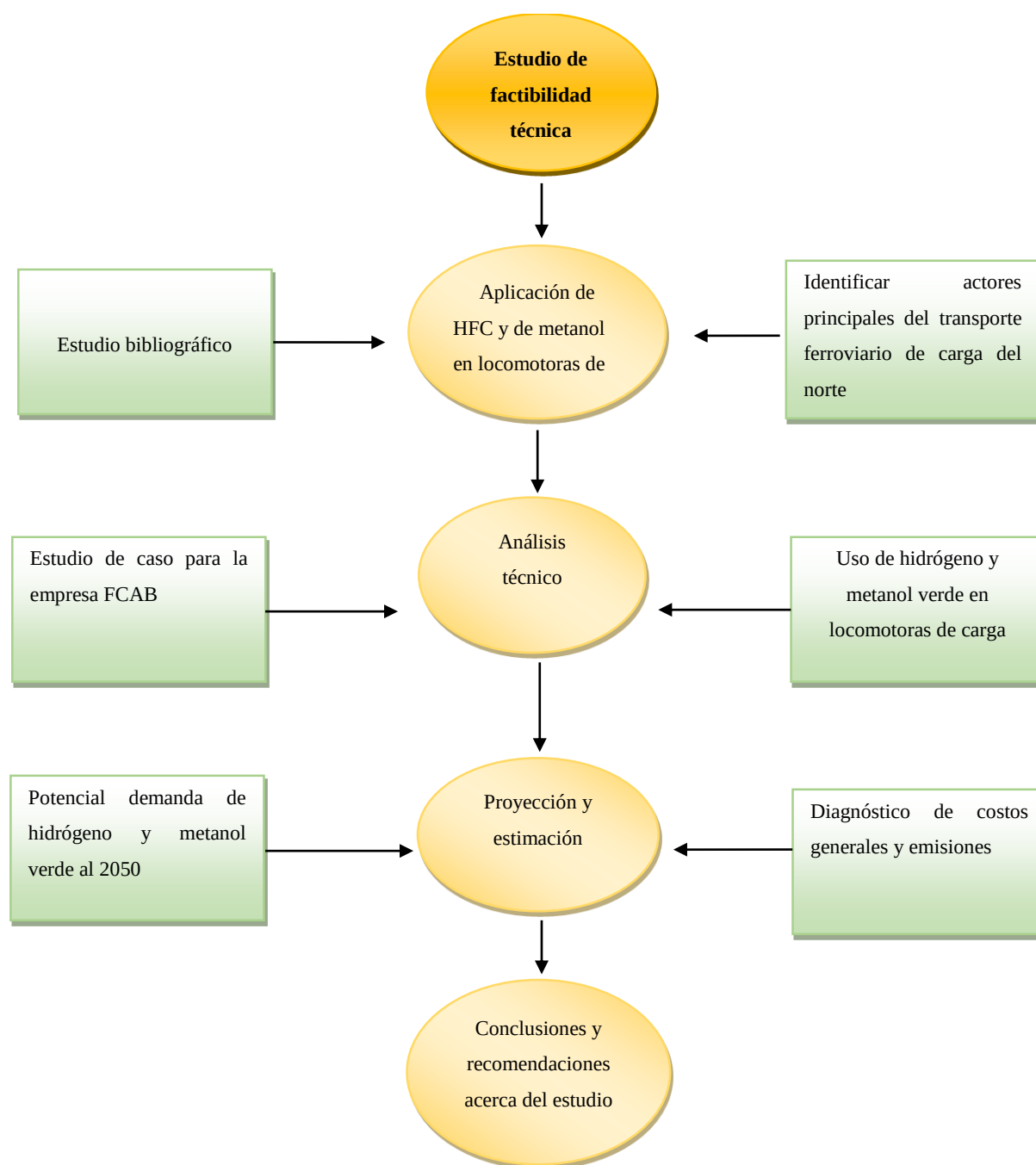
2 Metodología

2.1 Descripción general

La metodología de trabajo que se utilizó se basa principalmente en la revisión y estudio bibliográfico de la tecnología del hidrógeno, su principio de funcionamiento, antecedentes a nivel internacional que existen acerca de la aplicación de este en la industria de transportes de carga pesada y del potencial nacional para llevar a cabo dicha aplicación en Chile. A continuación, se muestra en la **Figura 12** un diagrama en el cual se describe de forma general los pasos a seguir establecidos para lograr alcanzar los objetivos finales de este trabajo, tomando como eje principal la aplicación de celdas de combustible a hidrógeno o Hydrogen Fuel Cell (HFC) y del e-metanol, un combustible derivado del hidrógeno verde, en locomotoras de carga, el cual surge gracias a un estudio en profundidad acerca de esta tecnología a nivel mundial, además de identificar los actores principales del sistema de transporte ferroviario de carga en la zona norte para lograr analizar en detalle la viabilidad de aplicación de dicha tecnología en esa área del transporte nacional. Posterior a ello se realizó un análisis técnico, el cual contempló el uso de HFC y del metanol en locomotoras de carga, para luego enfocar dicho análisis de manera específica a la flota de locomotoras pertenecientes a la empresa Ferrocarril Antofagasta-Bolivia, FCAB, el cual fue el caso de estudio en este proyecto en donde se consideró el uso de hidrógeno para tres situaciones, cuando se quiere adaptar una locomotora de diésel a hidrógeno interviniendo su composición interna, cuando no se puede intervenir la composición interna de esta y también cuando se da de baja una locomotora diésel para reemplazarla por una a base de hidrógeno proveniente de fábrica.

Finalmente, se confeccionó una proyección la cual incluye un estudio de la potencial demanda de hidrógeno requerida para una flota de locomotoras al año 2050, si bien, esta proyección se confeccionó para el caso estudio, se hizo pensando en que sea aplicable para locomotoras de carga en general, adaptando las características correspondientes. Además, de forma paralela se realizó un análisis de los costos y emisiones que implicaría la implementación de la tecnología a base de hidrógeno en dichos vehículos de transporte, considerando los casos en los que se deberá transformar la locomotora de diésel a hidrógeno o de diésel a metanol.

Figura 12: Diagrama de flujo de metodología implementada en el proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Estudio bibliográfico

Como ya se dijo anteriormente el elemento principal en la metodología de este proyecto fue el estudio bibliográfico, el cual se basó en revisar la mayor cantidad de información posible y recopilar lo más relevante acerca de las características del hidrógeno, su producción, las tecnologías que surgen en base a él y sus aplicaciones existentes en el área del transporte de carga pesada a nivel internacional, dando mayor énfasis en locomotoras de carga, tomando en cuenta siempre que todas estas deben producir cero emisiones, ya que, la motivación de usar este gas como combustible es que sea amigable con el medioambiente en su totalidad. También se investigó el contexto en el que se encuentra Chile con respecto a este tema para analizar qué tan viable es implementar esta tecnología en el país, encontrándose distintos documentos, como, la estrategia nacional de hidrógeno, la NDC y la alianza formada con la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ), los cuales avalan el potencial de este para dicha implementación y demuestran el compromiso nacional que se tiene referente al cambio climático. Por consiguiente, se encontró un respaldo para continuar desarrollando el proyecto, el cual además de utilizarlo claramente en el estado del arte, fue de utilidad para el **capítulo 3.1 Análisis técnico para la conversión de un tren a hidrógeno y metanol verde**, el **capítulo 3.2 Sistemas de seguridad y riesgo**, donde se analizaron ambas tecnologías en profundidad y por último en el capítulo **4.2 Diagnóstico de costos generales y emisiones**, donde se buscaron los valores de cada combustible en el proyectado en el tiempo.

2.3 Identificación de actores principales del sistema de transporte ferroviario de carga en la zona norte de Chile

En la zona norte del país, la cual contempla desde La Calera hasta Iquique, existen cinco empresas privadas de transporte ferroviario, dentro de las cuales dos de ellas, Ferrocarril Antofagasta- Bolivia(FCAB), con 800km de vía de las cuales sólo 730km se encuentran en servicio, y Empresa de Transporte Ferroviario(Ferronor), con 2139km de vía de las cuales sólo 244km se encuentran en servicio, prestan servicio público. Y las otras, Compañía Minera del Pacífico(CMP), con 135km de vía encontrándose todo en servicio, Sociedad química y minera(SQM) y Codelco división de Chuquibambilla, prestan servicio

privado. Pero todas realizan sólo servicios de carga, siendo los principales actores del sistema de transporte ferroviario de carga en la zona norte de Chile.

Dentro de estas empresas se transportan cargas similares, puesto que todas prestan servicio en su mayoría al área de la minería, por lo tanto, se decidió trabajar con una de ellas, tomando en cuenta que, al desarrollar el proyecto utilizando como caso estudio la flota de locomotoras de cualquiera de estas empresas, pudiese servir como referencia para el resto, claramente cambiando la información o los datos pertinentes. Sin embargo, otro de los motivos importantes por el cual se determinó efectuar el proyecto en dicha empresa, es que ellos tienen como meta dentro de los próximos años la implementación de la tecnología en base a hidrógeno a toda su flota de locomotoras, por ende, este trabajo de investigación encajaba bien con sus intereses y necesidades, y a su vez ellos fueron un gran complemento, entregando una base más sólida a todo esto, la empresa en cuestión es FCAB.

Cabe mencionar que en el sistema ferroviario nacional se trasladan alrededor de 25 millones de toneladas de carga al año, de los cuales 15,4 millones de ellos se mueven en el norte del país y a su vez dentro de esta cantidad, la empresa FCAB transporta alrededor de 6,4 millones de toneladas, lo que representa un 42% del total trasladado en la zona norte anualmente, lo cual indica que dicha empresa es una de las principales en la zona con una flota de 77 locomotoras diésel, según información entregada por ellos mismos. Por otro lado, también se tiene Ferronor, quienes serían otro de los actores principales en la zona, puesto que cuentan con una flota de 47 locomotoras de las cuales sólo 29 de ellas son utilizadas para el transporte de carga, según datos entregados por la subsecretaría de transporte, con las que logran transportar aproximadamente 8 millones de toneladas al año, cifra que representaría un 52% del total movido de forma anual dentro de la zona norte y el resto estaría cubierto por las otras empresas ferroviarias mencionadas anteriormente, CMP, SQM y Codelco, quien mueve un 1% de la carga trasladada. [36]

2.4 Análisis técnico

2.4.1 Análisis de una locomotora diésel

Mediante el estudio efectuado en cuanto a la estructura interna y principio de funcionamiento de una locomotora diésel, en el **capítulo 1.5 Especificaciones técnicas de una locomotora de carga**, se pudo conocer todos los componentes que se encuentran al interior de esta, es decir, máquinas, dispositivos, circuitos, entre otras cosas, y de esta forma entender cuáles de estos deberían ser retirados al momento de efectuar la transformación de diésel a hidrógeno o metanol, los cuales se analizaron en detalle en el **capítulo 3.1 Análisis técnico para la conversión de un tren diésel a hidrógeno y metanol verde (Tabla6)**. Esto se llevó a cabo, en primera instancia buscando información bibliográfica de forma generalizada acerca de las locomotoras de carga que se utilizan en Chile, para luego estudiar la información facilitada por la empresa FCAB, acerca de su flota de locomotoras en particular, la cual fue más específica, entregando datos técnicos tales como, potencia, kilometraje, recorrido, entre otros datos necesarios para los cálculos pertinentes. Todo esto con el fin de buscar alguna estrategia para lograr concretar la transformación de la locomotora diésel y de existir esta, evaluar su viabilidad.

2.4.2 Análisis de una locomotora a hidrógeno

Luego de analizar la estructura interna de una locomotora diésel, se procedió a hacer lo mismo con las locomotoras en base a hidrógeno, las cuales fueron estudiadas en el mismo capítulo mencionado para las locomotoras diésel. Posterior a ello se procedió a realizar lo mismo, pero en mayor profundidad usando como base la locomotora referencial de estudio, nombrada más adelante, para lograr identificar los dispositivos requeridos en la transformación mencionada anteriormente y analizarlos en detalle, todo esto se puede ver en el capítulo **capítulo 3.1 Análisis técnico para la conversión de un tren diésel a hidrógeno y metanol verde (Tabla5)**. Cabe mencionar que dentro de este grupo de locomotoras se tienen dos categorías, aquellas que utilizan la tecnología de celdas de combustible en base a hidrógeno y aquellas que usan metanol, ambas tecnologías son diferentes entre sí, por ende, se debió estudiar cada una de ellas por separado para conocer en detalle los elementos que forman parte de su estructura, los cuales eran primordiales para su óptimo funcionamiento, además de conocer factores técnicos, tales como, potencia del motor, eficiencia, entre otras

cosas. También se revisaron los riesgos asociados al uso, manejo y almacenamiento del hidrógeno y con ello los métodos de seguridad implementados tanto en los vehículos como en las estaciones de repostaje, como se muestra en el **capítulo 3.2 Sistemas de seguridad y riesgo**. Todo esto con el propósito de tener los conocimientos necesarios para llevar a cabo la transformación mencionada en el párrafo anterior y que esta resultara de manera óptima. Objetivo que se logró concretar luego de revisar proyectos de locomotoras a base de hidrógeno que están en funcionamiento y otros que se tienen en mente para concretar en un futuro próximo, como es el caso del Coradia iLint, el cual será el tren de referencia para el caso estudio en el grupo de los trenes con celdas de combustible. Y, para las locomotoras en base a metanol se utilizará como referencia un prototipo que se tiene como proyecto a concretar en un futuro próximo en la India.

2.4.3 Aplicación del análisis al caso de estudio

Luego de efectuar los análisis mencionados anteriormente, se aplicaron al caso estudio, el que consistió en transformar la flota de locomotoras de carga perteneciente a la empresa de Ferrocarriles Antofagasta-Bolivia, FCAB, de diésel a hidrógeno. Estas tienen un tiempo de garantía de 20 años durante el cual no pueden ser interferidas, sin embargo, no todas llevan el mismo tiempo de uso, por lo tanto, no a todas se les piensa efectuar la transformación de la misma manera, dividiendo la flota en tres grupos.

A un grupo de locomotoras diésel, las cuales tienen un tiempo de uso mayor al de la garantía, se le piensa aplicar el cambio de sus equipos para que estas funcionen con celdas de combustible. Por otro lado, el grupo que tiene un tiempo de uso menor al de la garantía, se le quiere realizar una adaptación para que estas puedan funcionar con metanol como combustible, debido a que para esta aplicación no se debe interferir mayormente la estructura interna de la locomotora, cómo, por ejemplo, cambiar el motor, sólo se le aplican ciertas modificaciones al mismo. Y, por último, existe un grupo que debido a su tiempo de uso ya tiene que ser dado de baja, por consiguiente, se quiere reemplazar por locomotoras con celdas de hidrógeno traídas de fábrica originalmente. Para llevar a cabo dicha aplicación se debieron realizar cálculos que permitieron verificar las necesidades energéticas de la flota y la manera en que podían ser cubiertas por las nuevas metodologías implementadas a base de hidrógeno, es decir, cantidad de equipos, combustible y todo lo estimado para cumplir con el

requerimiento energético de las locomotoras en base a lo impuesto por la empresa. Cabe mencionar que, se utilizaron los datos de las locomotoras de referencia mencionadas en el punto anterior, para realizar los cálculos tanto de hidrógeno como de metanol necesarios para generar cierta potencia y luego aplicar esto a la potencia requerida por la flota de trenes de la empresa según los datos entregados de ruta. Es importante destacar que todo este trabajo se desarrolló directamente con la empresa, formando parte de ella y del proyecto en cuestión. Las fórmulas para calcular las cantidades de los combustibles mencionados se muestran a continuación.

$$Combustible[kg] = \frac{E_{requerida}[kWh]}{E_{combustible}[\frac{kWh}{kg}] \cdot \eta} \quad (1)$$

Donde:

- Combustible: cantidad de hidrógeno o metanol requerida por cada locomotora en kilogramos.
- $E_{requerida}$: energía requerida por cada locomotora.
- $E_{combustible}$: energía que entrega 1 kilogramo de combustible.
- η : eficiencia de la celda de combustible para el caso del hidrógeno y del motor para el caso del metanol y el diésel.

Cabe mencionar que, la energía requerida será distinta para cada locomotora de la flota, puesto que, estas realizan distintos servicios, los cuales se van a especificar más adelante en el **Capítulo 3.3 Estudio de caso para la empresa FCAB**.

2.5 Proyección

Luego de calcular la cantidad de hidrógeno y metanol necesaria para abastecer la flota de locomotoras de la empresa FCAB, se procedió a realizar una proyección del combustible requerido para lograr que dichas tecnologías perduren en el tiempo, considerando que la transformación pensada no se efectuará en primera instancia a toda la flota al mismo tiempo, sino que, se hará de manera paulatina, por lo que se estimó realizar la proyección al año 2050, tiempo prudente para que toda la flota se encuentre en marcha con las nuevas tecnologías

aplicadas y así poder considerar la totalidad de locomotoras en el cálculo, además que es para esta fecha que FCAB tiene pensado como objetivo lograr cero emisiones por parte de su sistema ferroviario. Además de estimar en base a este cálculo la demanda de combustible verde requerido por el sistema ferroviario de la zona norte en general en caso de querer reemplazar el diésel y cumplir con la misma demanda energética, dichos resultados se pueden encontrar en el **capítulo 4.1 Potencial demanda de hidrógeno y metanol verde al 2050.**

Por otro lado, se confeccionaron cálculos para saber el costo que tendría cumplir con las demandas obtenidas, en primera instancia sólo haciendo alusión a la implementación del combustible en cada caso, es decir, sólo considerando el costo neto del combustible salido de la estación de reabastecimiento. Posterior a ello se efectuó un cálculo de lo mismo pero esta vez se incluyeron costos de inversión inicial y mantenimientos, ya sea en el caso de transformar la misma locomotora diésel, opción pensada tanto para el hidrógeno como el metanol o si se quiere comprar el equipo con la tecnología instalada de fábrica lo cual es una opción pensada sólo para el hidrógeno. En todos los casos se estimó un valor basado en cotizaciones realizadas por la empresa FCAB, que para el caso del hidrógeno tiene un costo similar en ambas opciones, sin embargo, este se considera casi el doble del valor que se tiene pensado para la opción del metanol. Este segundo cálculo se realizó con el fin de saber el costo que tendría ahorrarse una tonelada de dióxido de carbono, ya que, también se efectuó una proyección acerca de las emisiones que serían ocasionadas al seguir utilizando diésel de aquí al 2050, las cuales se ahorrarían si se aplicasen dichas tecnologías nuevas, todo esto con el objetivo finalmente de poder comparar ambos combustibles propuestos con respecto al diésel y decidir la mejor opción de implementación.

Finalmente, para contar con un análisis más completo acerca de las emisiones, se decidió incluir el estudio de otros contaminantes aparte del dióxido de carbono (CO₂), como el óxido de nitrógeno(NO_x), los compuestos orgánicos volátiles no metánicos(NMVOC) y el material particulado(PM), lo cual se basó en los resultados de una tesis donde se analizan los factores de emisión de los modos del sector transporte, claramente sólo se extrajeron los referentes al sector ferroviario, para con ellos efectuar los cálculos aplicando los datos respectivos a la empresa del caso estudio. Todo lo explicado se encuentra en detalle en el **capítulo 4.2 Diagnóstico de costos generales y emisiones.**

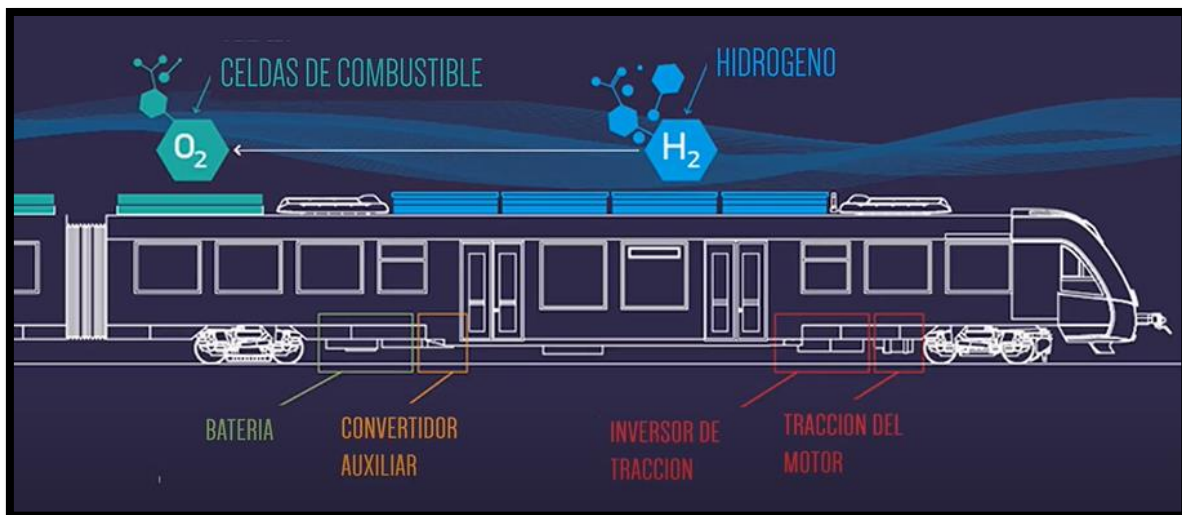
3 Análisis técnico del uso de hidrógeno y metanol verde en locomotoras de carga aplicado a la empresa FCAB

Este capítulo consta de tres partes, en primer lugar, se quiere estructurar un plan para tener una orientación sobre cómo llevar a cabo la transformación de una locomotora diésel a hidrógeno o metanol verde, como, por ejemplo, saber qué objetos se deben modificar o implementar en dicha locomotora para efectuar el cambio, es decir, un análisis netamente técnico a modo general, luego se analizan riesgos y sistemas de seguridad asociados a ambos combustibles, para terminar aplicando el primer análisis mencionado, al caso estudio, donde se prioriza ver el método para suplir los requerimientos energéticos propios de la empresa por medio de estos combustibles, sin dejar de lado factores espaciales y técnicos de las locomotoras.

3.1 Análisis técnico para conversión de tren diésel a hidrógeno y metanol verde

Para comenzar a estructurar el plan de orientación mencionado al inicio de este capítulo se procederá a analizar de forma detallada la estructura interna de una locomotora a base de celdas de hidrógeno, por medio del modelo de referencia, el primer tren de pasajeros a base de hidrógeno funcionando de forma óptima en el mundo, el cual se muestra a continuación.

Figura 13: Esquema del modelo de locomotora con celdas de hidrógeno llamada Coradia IInt y sus componentes.



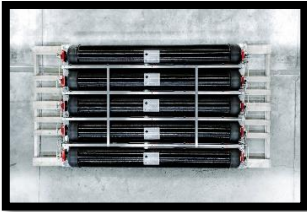
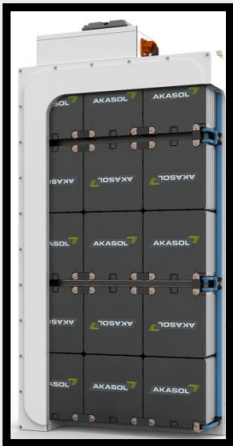
Fuente: [37]

Como se puede apreciar en la imagen, esta locomotora cuenta con dos celdas de hidrógeno ubicadas en la parte superior, las cuales tienen una potencia de 200 [kw] cada una y son las encargadas de proporcionar la electricidad para los motores de tracción durante la aceleración, baterías y los equipos a bordo, para ello utilizan 200 kilogramos de hidrógeno, el que se encuentra almacenado en estado gaseoso en los estanques ubicados en los depósitos del techo del vehículo, uno en cada vagón y logran proporcionar una autonomía de 1000 [km] a una velocidad de 140km/h, dando una demanda energética así de 0,2[kg/km]. Parte de la energía que entregan las celdas es almacenada en las baterías de iones de litio, que en este caso se cuenta con dos de 222[kwh] cada una, así como también se almacena la energía cinética recuperada durante el frenado, además de que estas abastecen al tren en funcionamiento normal y también se pueden usar para aumentar la aceleración del tren en caso de necesitarse. Luego se tiene el convertidor, quien se encarga de transformar la energía eléctrica recibida de la celda o de la batería para adaptarla a los distintos equipos a bordo, es decir, convierte esta de corriente alterna a continua, para luego pasar al inversor de tracción donde esta se vuelve a convertir en alterna trifásica y alimenta finalmente los motores de tracción quienes son los encargados de accionar las ruedas de la locomotora. También, este vehículo tiene un sistema de freno regenerativo, lo cual implica que, durante el frenado parte de la energía cinética se transforma en energía eléctrica, siendo esta recogida por el inversor quien la distribuye al convertidor y las baterías. Y, por último, cuenta con un sistema de control en el cual se integran todos los subsistemas del vehículo. [38] Cabe mencionar que si bien este es un tren de pasajeros y el proyecto en cuestión trata de locomotoras de carga, de cualquier forma, sirve como referencia para implementar la transformación de diésel a hidrógeno, puesto que, ambas tienen el mismo principio de funcionamiento, variando la cantidad de tanques de hidrógeno según sea los requerimientos de cada uno.

Tal como se dijo en el punto **1.5 Especificaciones técnicas de locomotoras de carga**, los principales elementos que se deben cambiar en una locomotora diésel para transformarla en una a hidrógeno son el motor y el generador, los cuales, serán reemplazados por la celda de hidrógeno, los tanques que alimenten esta y las baterías, por lo tanto, serán estos tres últimos elementos a los que se les analizarán sus características técnicas para verificar si concuerdan o bien se asemejan a las de la locomotora diésel, además de que sus dimensiones

sean aptas para el espacio con el que se cuenta en dicho vehículo. En esta oportunidad se utilizaron los artefactos provenientes de las empresas que proporcionaron los mismos al Coradia ilint, como Hydrogenics quien suministra celdas de combustible, Hexagon Xperion quien proporciona los tanques de almacenamiento y por último Akasol, quien hace lo mismo, pero con las baterías [8]. A continuación, en la siguiente tabla se muestran dichos artefactos mencionados con sus características y dimensiones.

Tabla 5: Imagen, características y dimensiones de los elementos a implementar en tren diésel para transformarlo a uno de hidrógeno.

Artefactos	Características	Dimensiones
Celda de hidrógeno Figura 14: Celda Modelo HyPM HD180 marca Hydrogenics..  Fuente: [39]	- Potencia eléctrica nominal: 198[kw] - Corriente de trabajo: 0-500[A] - Tensión de funcionamiento: 360-720[V] - Eficiencia máxima: 55% - Temperatura de operación: -10 - 55[°C] - Temperatura de almacenamiento: -40 – 65[°C]	- Largo: 0,955[m] - Ancho: 1,525[m] - Alto: 0,69[m] - Masa: 654[kg] - Volumen: 1,005[m³]
Tanques de almacenamiento de hidrógeno Figura 15: Cilindros de hidrógeno de alta presión Hexagon Purus.  Fuente:[40]	- No corrosivo, debido a la camisa de polímero. - Alta resistencia a la fatiga, debido a la fibra de carbono. - Sin fugas, debido a su válvula mecanizada. - Ligero. - Capacidad de hasta 200[kg] de hidrógeno a 350[bar]. - Energía disponible: 6660[kwh]	- Largo: 2,5[m] (Tanto la capacidad como dimensiones de los tanques son adaptables a las necesidades de cada caso.) - Diámetro: 0,5[m]
Baterías Figura 16: Sistema de baterías Akasol.  Fuente: [41]	- Energía: 33[kwh] - Potencia máxima de descarga: 150 [kw] (considerando 10 segundos) - Potencia máxima de carga: 100[kw] - Potencia continua de descarga: 50[kw] - Potencia continua de carga: 45[kw] - Tensión nominal: 655[V] - Capacidad: 50[Ah] - Ciclos de vida: >3000 (Ciclo de descarga de referencia de 0,33C)	- Largo: 1,7[m] - Ancho: 0,15[m] - Alto: 0,7[m] - Masa: 254[kg]

Fuente: [39][40][41]

A continuación, se procederá a analizar los elementos que deben ser retirados en una locomotora diésel para transformarla a una de hidrógeno como son, el motor, el generador y los tanques de gasolina, para luego realizar una comparación entre estos y los elementos mencionados anteriormente en la **Tabla 5**, ya que, estos último serán quienes los reemplacen. En esta oportunidad se utilizará como referencia la locomotora diésel GR-12, por consiguiente, los artefactos a evaluar, son los usadas por dicha locomotora.

Tabla 6: Características y dimensiones de elementos que serán retirados de la locomotora diésel para transformar este equipo a hidrógeno.

Artefactos	Características	Dimensiones
Motor diésel modelo 567C	- Potencia de tracción: 977 [kw] - Rpm máximo: 800-835 - Relación de compresión: 16:1 - N° de cilindros: 12	- Largo: 3[m] - Masa: 13000[kg] (aproximadamente) - Masa del combustible: 3209[kg]. (Considerando estanque lleno)
Generador principal y auxiliar	- Potencia: 10 [kw]	- Largo: 0,7 [m] (aproximadamente)
Depósito de gasolina	- Capacidad total de combustible: 3775[L] - Energía disponible: 18340[kwh]	- Largo: 1,8[m] - Ancho: 2,7[m] - Alto: 0,8[m] - Masa del combustible: 3209[kg]. (Considerando estanque lleno)

Fuente: [42]

Luego de analizar cada grupo de artefactos por separado, se está en condiciones para efectuar un análisis comparativo entre ellos, en primer lugar, se puede observar que, para lograr suplir la potencia entregada por el motor diésel, se debería contar con dos celdas de

hidrógeno, más cuatro baterías, de las mencionadas anteriormente en la **Tabla5**, puesto que estos elementos en conjunto proporcionarían un total de 996[kw], cifra que supera la potencia entregada por el motor que son 977[kw]. Luego con respecto a la energía proporcionada por el diésel, esta se calcula pensando en el total de capacidad disponible que son 3775[L], sin embargo, esto se transformó a kilos, por medio de la densidad del combustible que son 850[kg/m³][43], lo cual dio un total de 3209[kg], ya que, el cálculo energético está pensado con respecto a la masa de cada combustible. Para dicha masa el diésel tiene un total de energía útil disponible de 18340[kwh], considerando que este aporta 12,7[kwh/kg] [43] pero el motor tiene cierta eficiencia especificada más adelante, por consiguiente, del total de combustible sólo cierta cantidad aportará energía. Por otro lado, con respecto al hidrógeno, este aporta 33,3[kwh/kg] [43], por lo que, para lograr suplir el total de energía mencionado anteriormente, se debe contar con al menos 551[kg] de este gas, esto es sin considerar la eficiencia de la celda de combustible, factor que va a aumentar dicha cantidad, por consiguiente, si se utilizan los tanques de almacenamiento mencionados en la **Tabla5**, y se contempla una eficiencia de 0,5 se requerirían seis de estos tanques, lo cual daría un total de 1200[kg] de hidrógeno. Sin embargo, si bien todos estos elementos en conjunto no superan en peso, al de los elementos que se piensan retirar, se debe analizar si esto es viable por temas de espacio y factibilidad en cuanto al mantenimiento y manejo de la locomotora, por ende más adelante, cuando se aplique todo esto al caso de estudio en particular, se calculará cuanto hidrógeno sería necesario para lograr una autonomía considerablemente óptima, sin que afecte los otros aspectos mencionados, que son igualmente importantes.

En cuanto al metanol, no se realizó un análisis tan detallado, debido a que, para este caso, no se deben hacer grandes modificaciones en la locomotora en caso de querer transformarla de diésel a metanol, como el de retirar o agregar ciertos equipos, más bien la modificación será hecha directamente al motor, acción que no generará grandes variaciones en el funcionamiento o características técnicas del vehículo. De igual forma si es importante analizar la cantidad de metanol necesaria para suplir la energía que proporciona el diésel en su totalidad, considerando que este gas entrega 6,35[kwh/kg] [43] se necesitaría 2900[kg] de metanol para ello, ahora bien, claramente esto es un valor muy alto, con respecto a la masa requerida por el hidrógeno pero no más alta que la del diésel para entregar la misma energía,

por ende, para ambos combustibles propuestos se requiere de una menor cantidad que la utilizada actualmente para ello, sin embargo, es importante recordar que se está considerando la máxima capacidad de combustible que existe en el vehículo, lo cual no es un requisito de las locomotoras para poder funcionar de forma óptima, es decir, se podría efectuar su trabajo con menos combustible como se verá más adelante cuando se aplique todo este análisis al caso estudio.

Cabe destacar que en este segmento se quiso efectuar un análisis de forma general, para lograr tener una orientación con respecto a cómo llevar a cabo la transformación de una locomotora diésel a hidrógeno o metanol en caso de necesitarlo, puesto que, dicho procedimiento será similar para toda locomotora diésel, guardando las proporciones de los requerimientos que tenga cada una.

3.2 Sistemas de seguridad y riesgo

Además de analizar el proceso de aplicación y uso de la tecnología a implementar como tal, se requiere analizar en detalle los riesgos asociados que existen y cómo lograr prevenir estos, sobre todo en este caso que son muy poco conocidas e implementadas en el país actualmente, considerando además que se pone en juego la seguridad y bienestar de quienes las manipulen.

3.2.1 Riesgos asociados al uso del combustible

Si bien los riesgos asociados son similares para ambos combustibles que se mencionan en esta investigación, existen ciertas diferencias por lo cual se especificarán estos en cada uno.

Para el caso del hidrógeno, se tienen los siguientes peligros asociados a algunas de sus propiedades [44]:

- Las moléculas de hidrógeno son más pequeñas que las de todos los otros gases y puede difundirse a través de materiales considerados como herméticos o impermeables para otros. Por lo cual el hidrógeno resulta ser un gas más difícil de contener comparado con los demás. Además, que el tamaño de la molécula

aumenta la probabilidad de fuga y produce también una alta flotabilidad y difusividad.

- El hidrógeno puro es inodoro, incoloro e insípido, además de que los compuestos utilizados para perfumar el gas no pueden ser empleados para el uso en celdas de combustible, puesto que, contienen azufre y esto podría dañar el artefacto en cuestión. Por consiguiente, en caso de fuga esta sería casi imperceptible por el ser humano.
- Si bien el hidrógeno no es tóxico, puede llegar a ocasionar asfixia si es que desplaza el oxígeno del aire. En espacios cerrados fugas pequeñas no implican un riesgo significativo, mientras que grandes fugas puede tener consecuencias graves, debido a que este gas se difunde rápido por todo el lugar. Ahora bien, en espacios no confinados el potencial de asfixia del gas es casi nulo debido a la alta flotabilidad y difusividad del hidrógeno.
- Debido a la baja densidad energética o volumétrica que posee el hidrógeno, requiere que se transporte un gran volumen de este para proporcionar una autonomía adecuada, en caso de ser utilizado como combustible para vehículos, por consiguiente, es necesario que este se trabaje a altas presiones para lograr optimizar el espacio.
- El hidrógeno es altamente inflamable en un rango de concentración en el aire de 4-75% y explosivo en un rango de 15-59% a temperatura atmosférica estándar.
- Su temperatura de ignición es muy baja, lo cual implica, que basta con una mínima fuente externa de energía para lograr encender la mezcla de combustible.
- Su baja electroconductividad ocasiona que el flujo o la agitación del hidrógeno, ya sea, en estado líquido o gaseoso pueda generar cargas electrostáticas que den lugar a chispas, por lo tanto, todo el equipo de transporte de hidrógeno debe estar bien conectado a tierra.
- El hidrógeno arde con mayor vigor que la gasolina, ya que, al tener una alta densidad gravimétrica o másica, la energía liberada durante una reacción en base a la masa, es aproximadamente 2,5 veces, el calor de combustión de los hidrocarburos comunes, sin embargo, dura menos tiempo.

- Las llamas de hidrógeno son fáciles de ver en la oscuridad o con luz tenue, pero a la luz del día son casi invisibles.

Para el caso del metanol se tienen los siguientes peligros asociados a algunas de sus propiedades [45]:

- El metanol es un líquido altamente inflamable y de fácil ignición que arde y a veces explota en el aire.
- El peso molecular del vapor de metanol es ligeramente mayor o bien más denso que el del aire, por lo tanto, en caso de una fuga o derrame líquido, el vapor puede trasladarse a las zonas bajas en un espacio confinado y acumularse allí, sin embargo, este se disipa fácilmente en lugares ventilados, no así en espacios cerrados.
- En circunstancias específicas, el vapor del metanol puede explotar en lugar de arder al encenderse, por lo cual, los contenedores de estos están sujetos a explosionar cuando se calientan externamente.
- El metanol líquido y a vapor es tóxico para humanos, por lo cual, la ingesta de una pequeña cantidad, aproximadamente de 10 a 30 ml, puede causar la muerte y cantidades menores a eso puede causar ceguera irreversible. Además, de que este se puede absorber a través de la piel y otros tejidos directamente en el flujo sanguíneo, por consiguiente, se debe evitar a toda costa que entre en contacto con la piel.
- El metanol es totalmente miscible en agua y conserva su inflamabilidad incluso en concentraciones muy altas de agua, por ejemplo, en una solución de 75% de agua y 25% de metanol, se considera un líquido inflamable igualmente.

3.2.2 Sistemas de seguridad

En base a los riesgos mencionados anteriormente se tienen los siguientes sistemas de seguridad, los cuales deben ser tomados en cuenta al momento de emplear estas nuevas tecnologías, para hacerlo de forma segura y preventiva.

En primer lugar, para el caso del hidrógeno, si bien se considera que este es más seguro que otros combustibles, de igual forma sus propiedades son únicas y deben manejarse con el cuidado pertinente, por lo cual se tienen los siguientes sistemas [46]:

- **Sistema de detección de fugas:**

El mayor número de accidentes con hidrógeno es debido a fugas no detectadas, puesto que como se dijo anteriormente en sus riesgos asociados, este gas es inoloro, incoloro e insípido, por consiguiente, se debe ser especialmente meticuloso para este sistema, el cual consiste en un conjunto de sensores ubicados en lugares estratégicos del vehículo, conectados todos al sistema de control de este. Dichos sensores por lo general están calibrados para dar aviso al 5% y 15% del Lower flammability limit (LFL) del hidrógeno, y encender una alarma en caso de llegar al 25% de este, considerando que el LFL en este caso es del 4% de hidrógeno en el aire. Cabe mencionar que el LFL de un gas es la menor concentración que debe haber de este al mezclarse con aire para que se produzca la combustión. A su vez el sistema de control alertará al conductor y en caso de ocasionarse una alarma, se apagará el motor automáticamente. Con respecto a las fugas, estas pueden manifestarse a través de un sonido audible de gas, una caída de presión o bien activándose el sistema de detección, sin embargo, cuando estas son muy lentas puede que no se perciban de ninguna forma, por lo cual se debe considerar realizar pruebas de fugas como parte del mantenimiento en una celda de combustible. Estas pueden ser a través de tres métodos, observando la caída de presión que exista en un intervalo de tiempo, usando un detector de fugas manual (o “sniffer”), o bien empleando una solución para detección de fugas.

Para lograr detener una fuga se puede apretar la pieza donde se está ocasionando y en caso de persistir, esta debe ser cambiada. Es de suma importancia que esto se lleve a cabo en un lugar seguro donde el hidrógeno no pueda acumularse ni este expuesto a fuentes de ignición.

- **Sistema de detección de incendios:**

Como se mencionó dentro de los riesgos asociados al hidrógeno, una de sus características es que la llama es casi invisible a plena luz del día, lo que la hace difícil de detectar y es necesario tener un sistema para ello, como un sistema de supresión de incendios para detectarlos y extinguirlos, este consiste en una serie de sensores conectados al sistema de control del vehículo, diseñados para activar una alarma en caso de incendio y al igual que para el sistema anteriormente descrito estos sensores están ubicados en lugares estratégicos alrededor del vehículo, como debajo de las cubiertas del techo o en el compartimiento del motor. Ciertos sensores también pueden detectar el calor elevado y para el caso de las celdas de combustible, se puede incluir cables térmicos enrollados alrededor de estas, diseñados para provocar un cortocircuito en caso que se fundan, dando aviso de esto al sistema de control. A su vez este dará aviso al conductor en caso de que se active cualquier sensor y se apagará el motor, para luego dar paso a la descarga de los retardantes de fuego en la zona donde haya ocurrido la activación.

Ahora bien, el protocolo para combatir un incendio de hidrógeno es similar al de cualquier otro gas, lo principal es eliminar la fuente de combustible, sin embargo, como no es posible apagar la fuente de hidrógeno, el procedimiento estándar es evitar que el fuego se extienda mientras el gas se consume por sí mismo. Si bien se señala que sólo en caso de un incendio grande, se debe cortar el suministro para lograr extinguirlo, en un incendio de hidrógeno es recomendable realizar esto bajo cualquier circunstancia, de lo contrario puede volver a formarse una mezcla explosiva o inflamable con potencial de reavivar el fuego al contacto de superficies calientes o cualquier otra fuente de ignición. Y en caso de tener un incendio pequeño se recomienda combatir de igual forma con un extintor de polvo seco retardante.

- **Medidas de seguridad con respecto a la temperatura y presión:**

Los riesgos asociados a una baja temperatura, se manifiestan cuando se tiene hidrógeno almacenado de forma líquida, puesto que para este caso se utiliza una temperatura por debajo de -253°C , por lo cual se recomienda que depósitos de almacenamiento o cualquier otro equipo que contenga hidrógeno líquido, deben estar totalmente aislados con materiales

adecuados, para evitar cualquier tipo de contacto entre la piel y el líquido, sus vapores o bien las superficies que lo contengan directamente, debido a que eso podría generar grandes daños en ella. Además de evitar que el aire entre en contacto con ellos también, ya que, provoca un riesgo de incendio secundario. Lo mismo sucede para el caso de temperaturas altas, dentro de las cuales la más alta está presente a la salida del turbocompresor, superando los 200°C, por consiguiente, se recomienda evitar contacto con cualquier superficie que contenga tanto líquidos como gases en circulación.

Por último, como ya se ha mencionado en otra oportunidad, el hidrógeno se almacena a altas presiones, 350 bar en el caso de los trenes, la cual puede llegar a ser peligrosa si se produce alguna fuga o rotura de componente, por lo que, no se debe manipular ningún tipo de pieza que se encuentre expuesta a esta presión. También existen otros componentes que funcionan a altas presiones, como el aire, agua, aceite y refrigerante presente en el motor de la celda de combustible, por lo cual se debe tener especial cuidado al momento de tratarlo, puesto que, si bien existen circuitos que se despresurizan al momento de apagar el motor, hay otros que lo hacen de forma lenta o bien otros que no se despresurizan.

- **Medidas de seguridad con respecto a choques eléctricos:**

Todo tipo de vehículo impulsado por celdas de combustible contiene una variedad de componentes de alto y bajo voltaje, a su vez esta produce voltaje en proporción al número de celdas que posee, por lo que se alcanzan altos niveles de este, tanto de corriente alterna como continua, situación que ocasiona un peligro de descarga o electrocución, para lo que se utilizan barreras de alta tensión, que encierran cada uno de estos componentes ofreciendo protección contra estas situaciones, por consiguiente, es de suma importancia que aquella barreras estén bien ubicadas al momento de hacer funcionar la celda. Un detalle importante a mencionar es que una lectura de cero voltios en toda una celda no garantiza que todas las celdas estén descargadas, por este motivo, es recomendable asumir que estas están eléctricamente cargadas y evitar el contacto hasta confirmar lo contrario. Por último, se recomienda no usar joyas cerca del motor de la celda, puesto que pueden concentrar corriente eléctrica cuando se ven expuesta a ella, causando graves quemaduras por calor, además de llevar manos y ropa seca para minimizar la conductividad.

Luego para el caso del metanol se tienen los siguientes sistemas o métodos de seguridad basados en sus riesgos asociados [47]:

- **Medidas de control a la exposición:**

Como se mencionó en los riesgos asociados al metanol, este gas es altamente tóxico para el ser humano, por ende, se debe reducir la exposición de este al mínimo, manteniéndolo siempre dentro de sistemas cerrados y no dejarlo expuesto al ambiente. Es importante considerar además un buen sistema de ventilación, tanto para operar normalmente como en caso de fuga, si bien en algunas ocasiones bastará con una ventilación natural, en otros casos se requerirá de sistemas mecánicos de ventilación, finalmente el objetivo es que las concentraciones de metanol se mantengan por debajo de 200ppm, que es el límite seguro de exposición para los seres humanos. Es por esto que, dichas concentraciones deben ser supervisadas constantemente, por medio de mediciones hechas con distintos instrumentos, ya que, si bien el metanol tiene un ligero olor dulce a alcohol, este sólo se percibe al alcanzar una concentración de 2000ppm, cifra diez veces mayor al límite seguro de exposición. De hecho, por debajo de este límite no es necesario utilizar protección respiratoria, de lo contrario si se iguala o supera, es imprescindible utilizarla.

Cabe mencionar que en caso de inhalar este gas es recomendable salir al aire fresco, pero evitar enfriamiento y mantener el reposo, si se tiene un contacto con la piel u ojos, se recomienda lavar la zona inmediatamente con excesivas cantidades de agua y por último la ingesta de este puede ser mortal, por lo cual, para ese caso se requiere tratamiento médico de inmediato.

- **Medidas de seguridad en operaciones rutinarias y especiales:**

Es de conocimiento general que el metanol es inflamable, por lo tanto, cuando existe la presencia de electricidad estática se debe tener una serie de precauciones, ya que, esta puede inflamar el vapor del gas, dentro de dichas precauciones se encuentran, hacer una conexión a tierra con todos los equipos, está prohibido fumar, los equipos eléctricos deben ser a prueba de explosiones para cumplir con el Código Eléctrico Nacional, se debe contar con extintores

y con una ventilación suficiente para afrontar niveles máximos de vapor. Esto es con respecto a operaciones rutinarias, ahora bien, para el caso de operaciones especiales o de alto riesgo como la entrada en espacios confinados o trabajos en caliente, se le suman otras precauciones, tales como, contar un sistema mecánico de ventilación en los espacios confinados para mantener la concentración de metanol por debajo del límite explosivo inferior, que es de 60000 ppm pero sobre todo antes de entrar al lugar, verificar las concentraciones de metanol existentes en él y para trabajos en caliente se recomienda siempre establecer prácticas de cuidados contra incendios, considerando que el metanol tiene un punto de inflamación bajo, de 12°C, y una amplia gama de inflamabilidad, de 6%-36% en volumen.

- **Medidas de seguridad para materiales peligrosos:**

Según la “Norma de gestión de seguridad del proceso de OSHA” El metanol está clasificado como un material muy peligroso, por lo cual se tiene un sistema de “Gestión de seguridad del proceso” (PSM), donde se hace referencia a la producción, almacenamiento y uso seguro de este gas. Dentro de este sistema se menciona la importancia que tiene la participación de los empleados, quienes deben conocer en profundidad todo con respecto a la manipulación, procesos, límites, peligros y riesgos asociados al metanol, así como las medidas de seguridad requeridas para prevenir todo tipo de accidente, además de capacitarse, todo esto con el fin de lograr interiorizarse en el tema y así lograr una óptima operación y mantenimiento, realizando todo de manera minuciosa y planificada, analizando todo tipo de riesgo antes de actuar, todo esto con el objetivo de resguardar lo más posible la seguridad de quienes manipulen o bien se encuentren expuestos de alguna forma a este gas.

3.3 Estudio de caso para la empresa FCAB

Una vez analizadas y estudiadas las tecnologías que se pretenden implementar de manera general, se está en condiciones de aplicar esto al caso estudio, el cual fue explicado en detalle en la **sección 2.4.3 Aplicación del análisis al caso de estudio**. Donde se mencionó además que, en esta empresa, FCAB, prestan distintos servicios ferroviarios dentro de su flota, los cuales tienen distintas rutas, por ende, distintos requerimientos energéticos para llevarlos a cabo. A continuación, se muestra una tabla con la información acerca de todos ellos junto

con la cantidad de diésel, hidrógeno y metanol necesario para suplir dicho requerimiento, y el promedio para cada conjunto de datos, para luego tener una visión general al momento del análisis o futuros cálculos como la estimación de la autonomía que tendría la locomotora en cada caso de combustible, es importante mencionar que cada grupo de datos referente a cada servicio, abarca la ruta completa de viaje, es decir, ida y vuelta. Cabe destacar que el cálculo sobre la cantidad de combustible se efectuó con la **ecuación1**, la cual se detalla en la **sección 2.4.3**, mencionada anteriormente. Para lo cual se consideraron las siguientes eficiencias:

- $\eta_{motor\ diésel} = 0,45$ [48]
- $\eta_{celda\ de\ combustible} = 0,5$ (Ver Tabla2 en **Sección 1.3.1.3**)
- $\eta_{motor\ metanol} = 0,6$ [49]

Tabla 7: Datos del consumo energético y de combustible para todos los servicios ferroviarios junto con el promedio de cada uno.

Servicios	Distancia [km]	Consumo [kwh/viaje]	Diésel [kg/viaje]	H_2 [kg/viaje]	Metanol [kg/viaje]
Servicio1	10	1000	175	60	263
Servicio2	250	3500	612	210	919
Servicio3	400	4500	787	270	1181
Servicio4	400	4500	787	270	1181
Servicio5	400	4500	787	270	1181
Servicio6	500	7100	1242	426	1864
Servicio7	500	7100	1242	426	1864
Servicio8	600	7500	1312	450	1969
Servicio9	600	8500	1487	511	2231
Servicio10	900	9000	1575	541	2362
Servicio11	900	9500	1662	571	2493
Promedio	496	6064	1061	364	1592

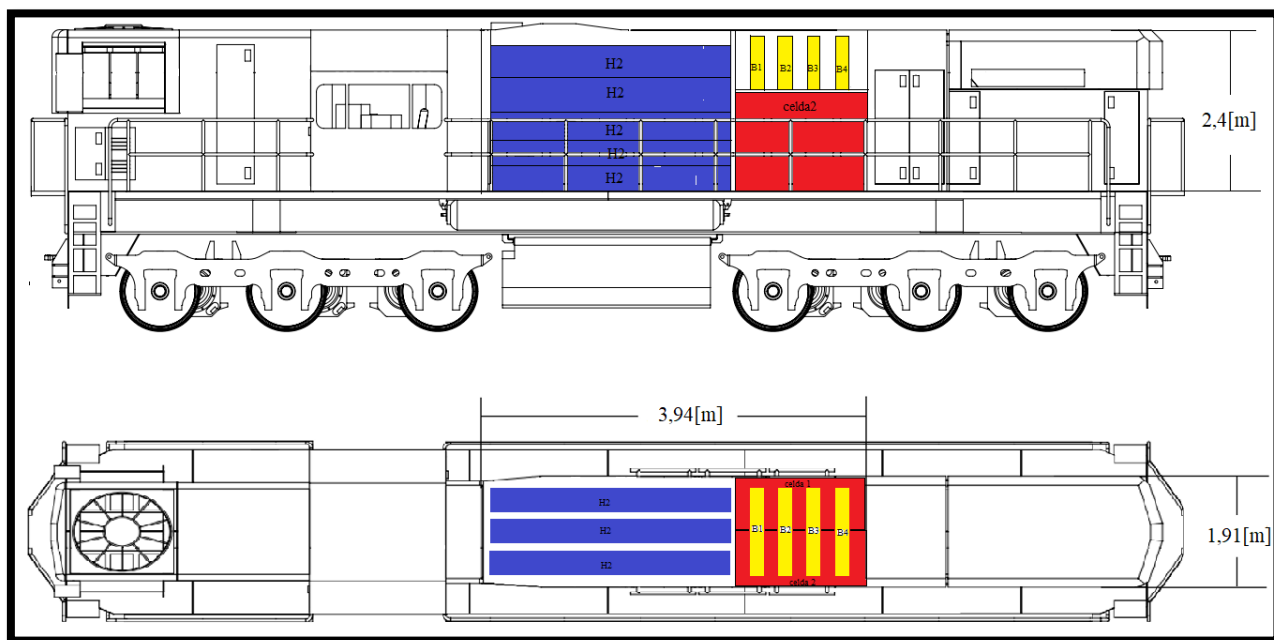
Fuente: Elaboración propia.

En base a esta tabla se puede conocer la cantidad de combustible que se necesita en promedio para suplir con las demandas energéticas de los servicios ferroviarios en general, sin embargo, puede que estas cifras no seas tan representativas, ya que, sus valores abarcan a menos de la mitad de los servicios en algunos casos, por lo cual, igualmente se tomará en cuenta los valores de las rutas más largas, al momento de evaluar con cuanto combustible se debería contar o bien cual conviene más usar.

Ahora bien, según los datos promedio el diésel tiene una demanda de 2,2[kg/km], el hidrógeno de 0,8[kg/km] y por último el metanol de 3,2[kg/km], siendo este último el de mayor demanda claramente, sin embargo, la diferencia no es tan grande con el diésel, por lo cual, en el siguiente capítulo se terminará de analizar su conveniencia, al momento de considerar otros factores como el económico y el medioambiental. Al igual que en el caso del hidrógeno, que si bien, es el de menor demanda de combustible por kilómetro, se debe analizar los otros factores para determinar su conveniencia o factibilidad de uso.

Pese a ello se procederá a estudiar una posible distribución espacial, considerando el espacio disponible en la locomotora GR-12, la cual fue la referencia para el análisis realizado en la **sección 3.1 Uso de la tecnología en locomotoras de carga**, esto basado en que este modelo de locomotora se encuentra dentro de la flota de la empresa, si bien, existen otros modelos dentro de la misma, son todos similares por lo cual dicho análisis fue pensado para ser aplicado a la flota en general. A continuación, se muestra el plano de dicha locomotora con los artefactos requeridos para transformarla de diésel a hidrógeno, los que fueron mencionados en la **Tabla5**, estos se ubicaron de tal forma que concuerde el tamaño de cada uno con el espacio que quedaría disponible luego de retirar los equipos que ya no serían utilizados, mencionados en la **Tabla6**.

Figura 17: Plano de locomotora GR-12 vista de costado y de arriba, transformada de diésel a hidrógeno, con una propuesta de distribución de equipos.



Fuente: Elaboración propia.

En la imagen, las figuras rojas representan las celdas de hidrógeno (2), las amarillas las baterías (4) y las azules los tanques de hidrógeno (15). Cabe mencionar que este plano es una aproximación de lo que podría ser la instalación de dichos equipos en la locomotora, puesto que si bien, se consideraron medidas y factores espaciales, se deben analizar en profundidad otros factores igualmente importantes, como conexiones, sistemas de ventilación o bien si es factible dicha distribución pensando en la practicidad al momento de realizar algún tipo de mantenimiento o reparación. Por otra parte, en base a la distribución propuesta, se puede apreciar que caben 15 cilindros de hidrógeno, de 200 [kg] cada uno, lo cual supone un total de 3000[kg], cantidad que otorgaría una autonomía de alrededor de 3800[km], la cual es más que suficiente para realizar cada uno de los servicios por separado sin recargar, e incluso más de uno. Es decir, podría considerarse tener menos tanques a bordo, tomando en cuenta que esto es ocupando la máxima capacidad de espacio que tiene la locomotora y con la mitad de ellos seguiría siendo más que suficiente para cubrir los servicios. Por otro lado, con el metanol se requieren alrededor de 2880[kg] para realizar los últimos dos servicios, los cuales, si cabrían en el tanque de combustible existente en la locomotora, ya

que, este cuenta con una capacidad máxima de 3775[L], los cuales al transformarlos a contenido másico por medio de la densidad de este gas, que son $792[kg/m^3]$ [43], da un total 2990[kg]. Por lo tanto, para este último combustible tampoco habría necesidad de recargar en el trayecto, pensando en el caso que se cuente con el tanque lleno o casi lleno.

Finalmente, en este capítulo se buscaba realizar un análisis netamente técnico, es decir, enfocarse en los artefactos necesarios para llevar a cabo la transformación de una locomotora de diésel a hidrógeno y así generar una orientación sobre qué elementos quitar, dejar o implementar para que esto se concrete, todo esto a grandes rasgos claramente, puesto que existen detalles no abordados en esto, que si bien son más específicos, son igualmente importantes al momento de materializar este proyecto, sin embargo, no era el enfoque de este análisis, donde se quería generar una noción sobre el tema a modo general, cosa que si se logró. Por otro lado, se le dio mayor énfasis al análisis energético, el cual, se quiso estudiar en detalle, puesto que, es un factor muy importante y decisivo al momento de determinar la factibilidad del proyecto, considerando que lo anterior sería una inversión inicial, pero en el caso de los combustibles, este será un costo operacional constante una vez que se ponga en marcha este cambio tecnológico. Ahora bien, en esta sección sólo se vieron factores energéticos y cantidades asociadas de cada uno con respecto a ello, en el siguiente capítulo se analizarán los factores económicos y medioambientales relacionados, para completar el estudio y determinar una conclusión global referente al tema.

4 Proyección de demanda al 2050, costos y emisiones relacionados al suministro de combustible en base a hidrógeno

A continuación, se efectuarán los cálculos para proyectar la demanda de combustible, tanto de hidrógeno como metanol, necesario para suplir los requerimientos del sistema ferroviario del norte de Chile, enfocándose en primer lugar en los servicios realizados por la empresa FCAB, puesto que es el caso estudio del proyecto, es decir, donde se desarrolló este, para luego en base a ello, realizar una estimación de lo que sería la demanda de combustible a nivel general en todo el sistema de la zona norte, proyectando así la implementación de dichos combustibles en todo el sistema ferroviario del norte del país para el año 2050. Luego en base a dichas demandas del caso estudio, se calcularán los costos respectivos a la implementación de cada combustible y las emisiones que lograrán disminuirse al concretar esto, proyectándolo todo al año 2050 también.

4.1 Potencial demanda de hidrógeno y metanol al 2050

En esta sección se concretó lo mencionado anteriormente como primera cosa, es decir, el cálculo de la demanda de hidrógeno y metanol, como se muestra en la siguiente tabla, considerando los datos proporcionados por la empresa FCAB acerca del consumo anual de diésel en cada servicio ferroviario que efectúan, cabe mencionar que, si bien este dato fue entregado en unidad de volumen, se decidió expresar en unidad de masa transformándolo por medio de la densidad del combustible, la cual se especifica en el capítulo anterior, **3.1 Análisis técnico para la conversión de un tren diésel a hidrógeno y metanol verde**, sección en la que también se menciona la energía que proporciona el diésel por kilogramo, dato con el que se logra calcular la energía consumida de forma anual en cada servicio en base al combustible gastado. Luego en función a esta demanda energética y considerando también la energía que proporciona tanto el hidrógeno como el metanol por cada kilogramo, datos que también se entregaron en el capítulo nombrado anteriormente al igual que los otros, se llegó finalmente a descubrir la cantidad de cada combustible requerido para suplir dicha demanda anualmente.

Tabla 8: Datos del consumo anual de energía y combustible para cada servicio ferroviario junto con el total de cada uno.

Servicios	Energía [kwh/año]	Diésel [kg/año]	H_2 [kg/año]	Metanol [kg/año]
Servicio1	6.315.075	1.105.000	379.284	1.657.500
Servicio2	15.787.688	2.762.500	948.209	4.143.750
Servicio3	19.431.000	3.400.000	1.167.027	5.100.000
Servicio4	4.857.750	850.000	291.757	1.275.000
Servicio5	8.258.175	1.445.000	495.986	2.167.500
Servicio6	9.715.500	1.700.000	583.514	2.550.000
Servicio7	29.146.500	5.100.000	1.750.541	7.650.000
Servicio8	8.986.838	1.572.500	539.750	2.358.750
Servicio9	21.131.213	3.697.500	1.269.142	5.546.250
Servicio10	8.743.950	1.530.000	525.162	2.295.000
Servicio11	17.973.675	3.145.000	1.079.500	4.717.500
Total	150.347.363	26.307.500	9.029.872	39.461.250

Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se puede apreciar que, dentro de los tres combustibles mencionados, el que se necesita en mayor cantidad para cumplir con la demanda energética anual de la empresa es el diésel, seguido del metanol y finalizando con el hidrógeno, siendo este último requerido en una medida mucho menor si lo comparamos con los otros dos. Esto es debido a la diferencia que existe entre los aportes energéticos de cada uno, siendo el del hidrógeno mucho mayor que el del metanol y el diésel, motivo por el cual se podría pensar que el primero es más conveniente entre los tres combustibles, sin embargo, aún quedan parámetros por analizar, como son los costos y factores de emisiones, lo cual se verá en la siguiente sección.

Para el caso del metanol, se observa que no hay una gran diferencia de cantidad con el diésel, como con el hidrógeno, no obstante, al igual que para el caso anterior, existen parámetros pendientes por analizar, los cuales pueden ser determinantes al momento de

decidir si vale la pena efectuar el cambio del diésel por alguno de los otros dos combustibles, cuál de ellos sería o bien si serían ambos.

Ahora bien, como se ya tienen las cantidades de combustible, tanto hidrógeno como metanol, requeridos para cubrir las demandas energéticas de la empresa FCAB, se está en condiciones de realizar una estimación para todo el sistema ferroviario de la zona norte, al considerar que como ya se dijo en la **sección 2.3 Identificación de actores principales del sistema de transporte ferroviario de carga en la zona norte de Chile**, dicha empresa transporta el 42% de lo que se mueve anualmente en el norte, por lo cual las cantidades totales estipuladas en la **Tabla8**, representarían también la misma cantidad de porcentaje con respecto al combustible total requerido anualmente en la zona norte. En base a esto se estimaron las siguientes cantidades.

Tabla 9: Combustible requerido estimado para todo el sistema ferroviario del norte de Chile.

Tipo de combustible	Total de combustible[kg/año]
Diésel	62.636.905
Hidrógeno	21.499.696
Metanol	93.955.358

Fuente: Elaboración propia.

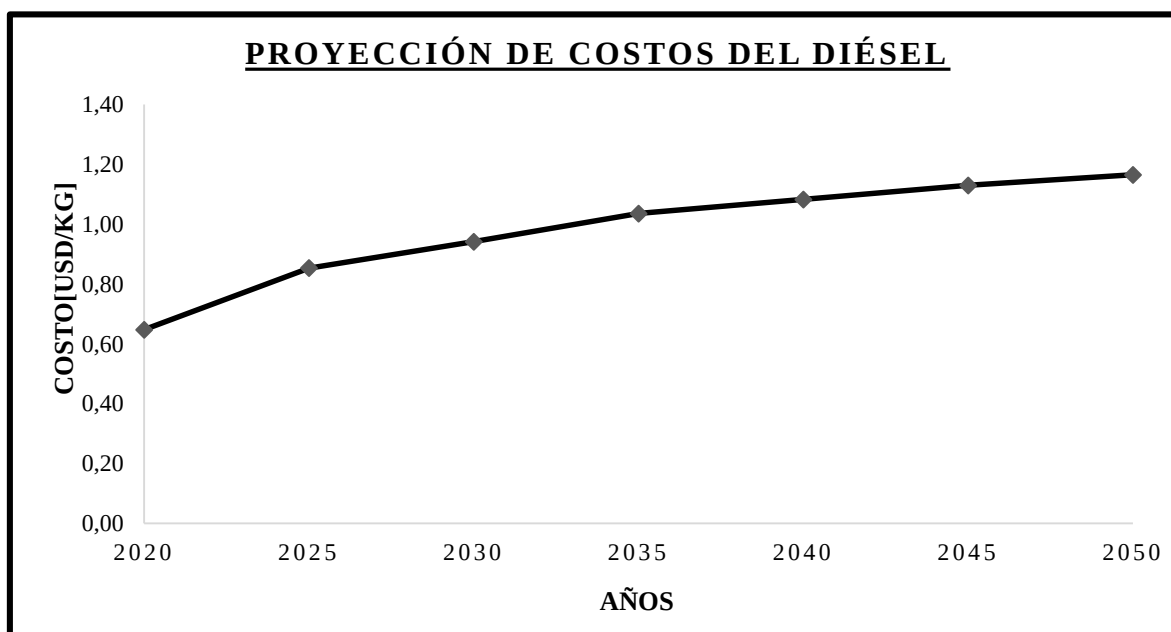
Cabe resaltar que dichas cantidades calculadas son tan sólo una estimación, es decir, valores aproximados de lo puede llegar a ser la cantidad total de hidrógeno o metanol necesario para cubrir la demanda energética anual de todo el sistema ferroviario en el norte del país, con el objetivo de contar con algún indicio que permita generar una idea con respecto a la magnitud de combustible requerido para ello. Es importante resaltar esto puesto que, claramente existen otros factores involucrados que no se consideraron en el cálculo de dichos valores, como la flota de locomotoras de cada empresa junto con los requerimientos energéticos que pueden tener estas, considerando que son distintos modelos, con distintas fichas técnicas, sin embargo, son todos similares entre sí o bien no cuentan con grandes diferencias que las hagan alejarse tanto del grupo como para no poder utilizar dichos valores a modo de referencia. Por último, con respecto al análisis comparativo entre las cantidades

de cada combustible, este sería el mismo al que se hizo para la **Tabla8**, por ende, no se entrará en detalle.

4.2 Diagnóstico de costos generales y emisiones

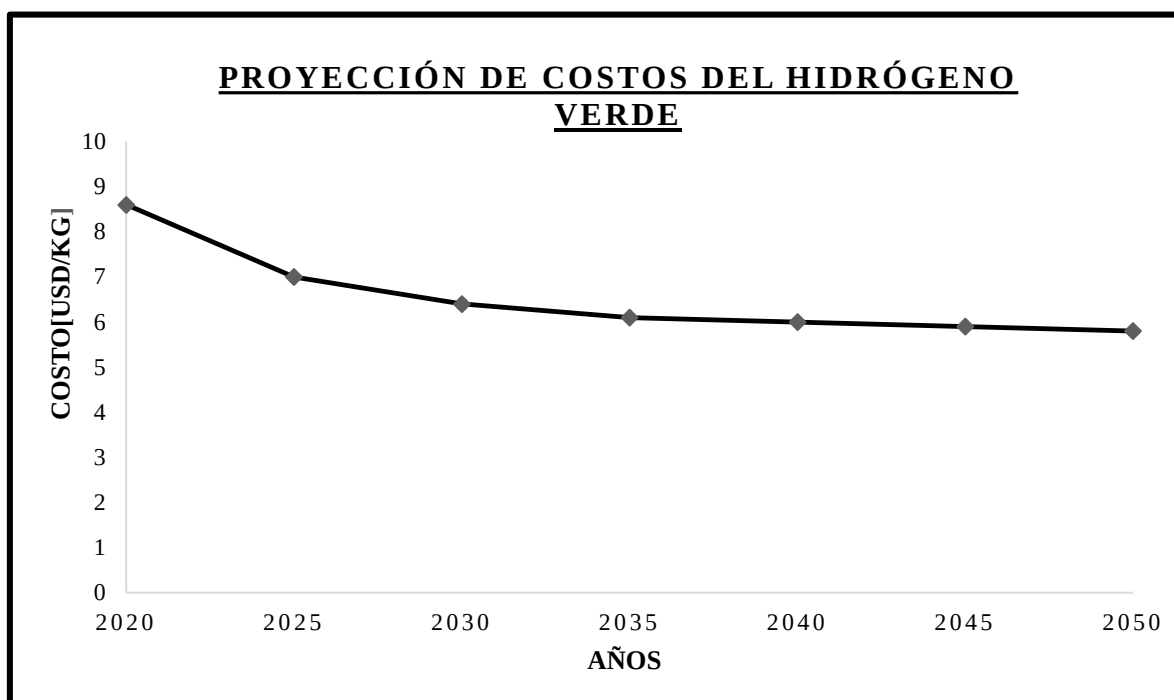
Una vez calculadas las demandas de combustible como se muestra en la sección anterior, tanto para el caso estudio como para el sistema ferroviario de la zona norte en general, se puede calcular los costos que implica poder cumplir con dichas demandas del primer caso, es decir, el costo de contar con las cantidades de combustible que se muestran en la **Tabla8**, específicamente con los valores totales, considerando que esto será todo el combustible requerido por la empresa de forma anual. Ahora bien, cabe mencionar que, tal como se dijo al inicio de este capítulo, se quiere hacer una proyección tanto de los costos como de las emisiones, por lo cual, para lo primero se tomó en cuenta el costo por kilogramo de combustible en dólares para cada caso a lo largo del tiempo, desde el 2020 hasta el 2050, como se muestra a continuación en los siguientes gráficos.

Figura 18: Proyección del precio del diésel al 2050.



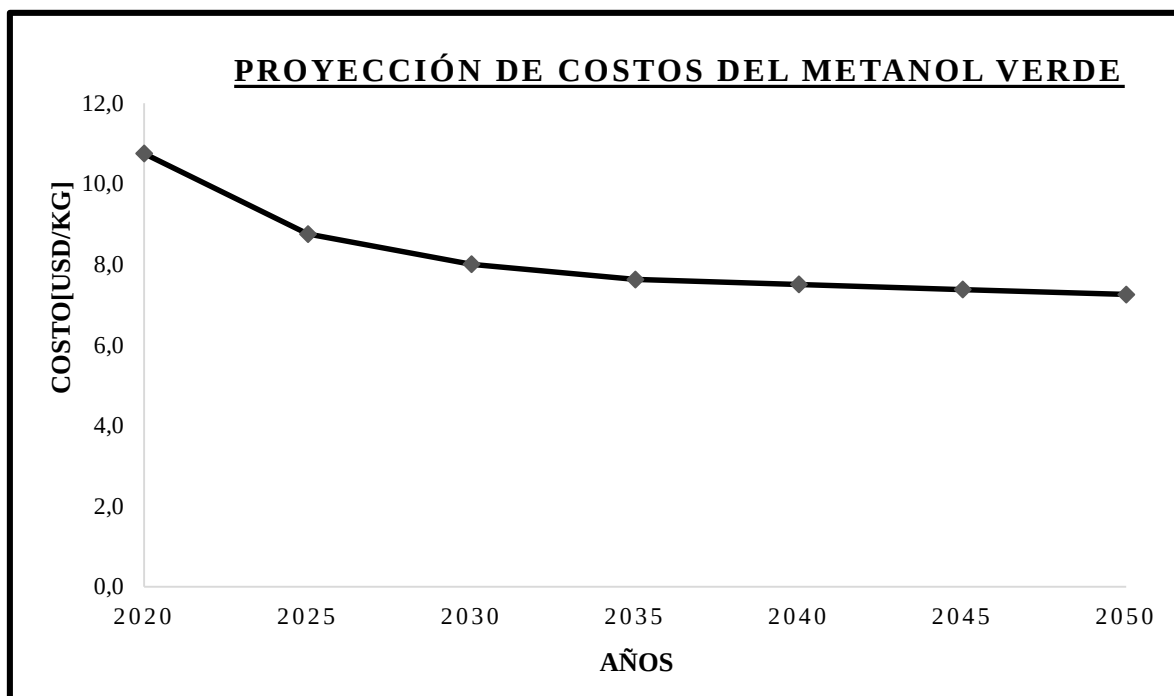
Fuente: [50]

Figura 19: Proyección del precio del hidrógeno verde al 2050.



Fuente: [51] [12]

Figura 20: Proyección del precio del metanol verde al 2050.



Fuente: [52]

Al analizar estos tres gráficos se puede apreciar que, el único combustible que va aumentando su costo a lo largo de los años es el diésel, llegando al doble de su precio desde el inicio al término del periodo de tiempo proyectado, mientras que el hidrógeno y el metanol verde disminuyen en un tercio aproximadamente. Si bien el precio de estos dos últimos se comportan de la misma forma a lo largo del tiempo, es importante mencionar que, los costos de cada uno son diferentes, siendo en el caso del metanol un poco más altos, considerando que este se produce a base de hidrógeno verde y aparte existen otros procesos adicionales para su formación que lo encarecen. A continuación, se muestra una tabla donde se visibilizan las cifras obtenidas al multiplicar estos valores por la cantidad de combustible calculada como el total anual requerido por la empresa del caso estudio, cabe mencionar que, para efectos de cálculo y proyección, se consideró que todos los años se necesita la misma cantidad de combustible, lo cual es una estimación solamente para lograr cumplir con el objetivo, ya que, esto claramente puede ir variando a lo largo de los años.

Tabla 10: Costos totales anuales de implementación para cada tipo de combustible, proyectados al 2050.

Año	Costo total anual Diésel[USD]	Costo total anual H2[USD]	Costo total anual Metanol[USD]
2020	17.022.500	77.656.896	424.208.438
2025	22.438.750	63.209.101	345.285.938
2030	24.760.000	57.791.178	315.690.000
2035	27.236.000	55.082.217	300.892.031
2040	28.474.000	54.179.230	295.959.375
2045	29.712.000	53.276.243	291.026.719
2050	30.640.500	52.373.255	286.094.063

Fuente: Elaboración propia.

Luego de observar la tabla y realizar un análisis comparativo entre los costos del diésel y el hidrógeno verde se puede notar que, si bien la implementación de este último sería mucho más costosa que el diésel, a lo largo de los años, esta situación se irá regulando en parte, puesto que, de pasar a ser cuatro veces más caro el costo del hidrógeno con respecto al diésel, esto pasará a ser menos del doble, lo cual si bien no deja de ser una inversión

considerablemente alta de realizar, lo convierte en una opción más asequible. Además, existen otros factores que pueden influir para acortar esta brecha entre los costos, por un lado, el diésel se inclina más al alza, por ende, los valores utilizados en la proyección podrían ser más alto con el pasar del tiempo, por el contrario del hidrógeno verde, que tiene una tendencia a la baja, por lo cual, los valores considerados en la proyección podrían ser menores. Ahora bien, para hacer estos combustibles verdes más competitivos con respecto al diésel, el precio del hidrógeno debería ser un 77% menos y el del metanol un 96%, considerando los costos en la actualidad. Por otro lado, el contar con una mayor eficiencia en la celda de combustible también es un factor de suma importancia, puesto que, ello implica necesitar menos kilogramos de hidrógeno para entregar la misma cantidad de energía, por lo tanto, menores costos también. Esto considerando que se efectuaron los cálculos pensando en una eficiencia del 50%, valor que, si es mayor en algunas celdas, aunque manteniendo los mismos costos en cada combustible, incluso tener una eficiencia del 100% no va a implicar una mayor conveniencia a nivel económico por parte del hidrógeno o que este equipare sus costos con los del diésel, pero si ayudaría a que fuese una idea más asequible. Ahora bien, se puede llevar a cabo de forma paulatina, partiendo con una parte de la flota de locomotoras, para luego llegar a su totalidad, cuando aquello sea más conveniente a nivel económico para la empresa.

Por otro lado, para el caso del metanol este siempre tiene un costo extremadamente más alto que los otros dos combustibles, lo cual no lo hace competitivo e incluso podría pensarse en la opción de descartarlo como tal en el corto y mediano plazo, sin embargo, existe un punto importante que lo favorece y es el hecho de que la inversión inicial para su implementación es mucho más baja que para el caso del hidrógeno verde, tomando en cuenta que, para el metanol no se requiere realizar grandes transformaciones en la locomotora, por ende, no es necesario invertir en equipos nuevos, más que en la modificación del motor, lo cual implica un costo mínimo de inversión, no obstante, el costo del combustible en si no deja de ser considerablemente alto, motivo por el cual se podría tener en consideración al igual que para el caso anterior, es decir, tenerlo como una opción para sólo una parte de la flota de locomotoras, ya que, es una inversión más rápida y menos costosa de concretar, mientras se logra efectuar la inversión para implementar el hidrógeno verde.

Finalmente, se procederá a realizar una proyección y posterior análisis sobre todas las emisiones que se lograrán ahorrar al implementar estos combustibles verdes. A continuación, se muestran las toneladas de dióxido de carbono (CO₂) emitidas al año por cada servicio ferroviario efectuado por FCAB, gracias a información proporcionada por la misma empresa.

Tabla 11: Cantidades de toneladas de CO₂ emitidas al año por cada servicio ferroviario de FCAB.

Servicios	Emisiones de CO ₂ [tCO ₂ /año]
Servicio1	3.120
Servicio2	7.800
Servicio3	9.600
Servicio4	2.400
Servicio5	4.080
Servicio6	4.800
Servicio7	14.400
Servicio8	4.440
Servicio9	10.440
Servicio10	4.320
Servicio11	8.880
Total	74.280

Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se puede apreciar que la empresa FCAB emite un total de 74.280 toneladas de dióxido de carbono al año, cifra estipulada para el 2020, debido a los servicios ferroviarios que efectúa. Por lo cual, si se proyecta dicha cantidad al año 2050, considerando que transcurre un rango de tiempo de 30 años, se tendría un total de 2.228.400 toneladas de dióxido de carbono emitidas al finalizar este periodo, las cuales podrían ser ahorradas al implementar estos combustibles cero emisiones. Sin embargo, este ahorro tiene un costo claramente, el cual se estimó de la siguiente forma. En primer lugar, se calculó el monto total de dinero utilizado para la compra del combustible requerido por la empresa anualmente a lo largo de todo el periodo proyectado, esto con cada uno de los combustibles involucrados, basado en los valores registrados en la **Tabla10**, luego al monto del hidrógeno y metanol

verde se le sumó lo que se tiene pensado de manera aproximada como inversión inicial, basado en cotizaciones efectuadas por la empresa, por lo cual se prefiere no especificar dichas cifras y posterior a ello se realizó el cálculo final por separado para cada uno de los combustibles verdes, el cual consistió en tomar el monto total necesario para su implementación, restarle el costo de seguir utilizando diésel y eso dividirlo entre el total de toneladas de dióxido de carbono ahorradas durante el rango de años proyectado, mencionado anteriormente, lo que dio como resultado un costo de 636 dólares por cada tonelada de CO₂ que se ahorre de aquí al 2050 en el caso de implementar hidrógeno verde y de 4.154 dólares en caso de implementar metanol verde.

Por otra parte, la empresa FCAB tiene como compromiso disminuir sus emisiones en un 30% para el 2030, lo cual equivale a generar 22.284 toneladas de CO₂ menos al año, para lo que se deberían utilizar 7.428.000 kilogramos de diésel menos anualmente, considerando que por cada kilogramo de diésel se generan 0,003 toneladas de CO₂, situación que se podría lograr si se modifican los servicios 1, 2, 3 y 4. Para concretar ello se requeriría efectuar un cambio en 27 locomotoras de la flota, además de la utilización de 2.786.277 kilogramos de hidrógeno, o 12.176.250 kilogramos de metanol, lo cual suma un total para invertir de alrededor de 155 millones de dólares y 175 millones de dólares respectivamente, de aquí al 2030, si se utilizara sólo uno de los dos combustibles, sin embargo, también existe la opción como ya se dijo anteriormente de mezclar ambas tecnologías, es decir, implementar hidrógeno a una parte de la flota y metanol a otra, opción que podría resultar más factible a nivel económico, pero se debería analizar en detalle para afirmar esto en su totalidad. De cualquier forma, estos valores, si bien son altos, se encuentran dentro de los márgenes, si se considera que en Europa tienen presupuestado invertir alrededor de 900 dólares para disminuir una tonelada de CO₂.^{[53][54][55]}

Posteriormente, también se quiso estimar las emisiones de otros contaminantes producidos por el transporte ferroviario, si bien, el CO₂ es el más representativo dentro de los gases de efecto invernadero, estos que se muestran a continuación no dejan de ser relevantes, como es el caso del óxido nitroso(NO_x), los compuestos orgánicos volátiles no metánicos(NMVOC) y el material particulado(PM), sin embargo, para ellos el cálculo se realizó de distinta forma, puesto que, en esta ocasión se utilizaron los resultados obtenidos

en una tesis investigativa donde se analizan los factores de emisión del transporte en el periodo de 2020-2050, para lo cual, en el transporte ferroviario específicamente se utiliza la metodología del Banco Europeo de Inversiones(BEI) y la estrategia ESRS desarrollada por la Unión International de Ferrocarriles(UIC), para saber más detalle acerca de estas metodologías se puede visitar la tesis mencionada, la cual quedará como referencia del párrafo. A continuación, se muestra la tabla con los valores obtenidos según estos resultados, cabe mencionar que para dichos cálculos se consideró la demanda energética anual de la empresa, siendo esta un total de 150.347.363 [kwh/año], la cual se transformó a megajoule para lograr efectuar el cálculo, considerando que 1[kwh] es equivalente a 3,6[MJ] [43] y para el caso del CO₂ se usó la cantidad total anual de diésel utilizado, el cual aparece mencionado en la **Tabla8**, si bien este contaminante ya se había calculado anteriormente, se decidió reafirmar su valor puesto que, este es otra metodología empleada.

Tabla 12: Emisiones generadas por servicios ferroviarios de la empresa FCAB.

Contaminante	Factor de emisión	Cantidad [T/año]
CO₂	3,16[kg/kg]	83.132
NO_x	1,32[g/MJ]	714
NMVOC	0,088[g/MJ]	48
PM	0,0036[g/MJ]	2

Fuente: [56]

Como se aprecia en la tabla, el valor obtenido de CO₂, dio un 12% mayor al reportado por la empresa, mencionado en la **Tabla 11**, lo cual se debe principalmente, a que son distintos métodos de cálculo, basados en distintos escenarios, sin embargo, estos son relativamente cercanos, por lo cual, se puede inferir que los datos y cálculos mencionados anteriormente acerca de las emisiones de dióxido de carbono serían validados mediante esta última metodología.

Ahora bien, en cuanto a la relación entre costos y emisiones, si bien el costo de implementar estos combustibles verdes es elevado, el costo de no realizar el cambio puede ser mayor aún, considerando la crisis climática que se está viviendo, la cual se agudiza cada vez más y el aporte que se realizaría por medio del ahorro de estas emisiones, sería una cifra

considerable de aquí al 2050 e incluso sabiendo que el hecho de generar dióxido de carbono también puede tener un costo monetario por medio de un impuesto, el cual ya se aplica en algunos países. Es importante destacar además que, dichos costos podrían ser menores, ya que, el precio del hidrógeno y metanol verde tienen una tendencia a la baja con el pasar del tiempo, puesto que, Chile tiene un gran potencial con respecto a este tema, por lo cual, es muy posible que los valores proyectados en ambos casos, mostrados en la **Figura 19** y **Figura 20**, respectivamente, disminuyan.

Finalmente, con todo esto se puede inferir que, según la estimación y proyección, tanto de demanda de combustible, como de costos y emisiones, la implementación hidrógeno y metanol sería una opción muy factible de realizar, siendo la mayor traba, el factor económico, sin embargo, como ya se dijo, este también puede variar para beneficio del inversionista y de hecho es lo más probable que suceda según la información estudiada, por ende, todo apunta a que tanto el hidrógeno como el metanol son un buen candidato para ser el sucesor del diésel en el transporte ferroviario de carga. De cualquier forma, es un cambio que se debe realizar de forma paulatina, ya que, aplicar la transformación a la totalidad de locomotoras produciría un impacto muy grande a nivel económico para la empresa o bien para el sistema ferroviario en general, además de que es una tecnología que aún está en estudio en nuestro país, con proyectos de producción, pero no de utilización, por lo que, se debe ir probando lentamente, ya que, si bien existen locomotoras a base de hidrógeno funcionando exitosamente en el mundo, se deben contemplar otros factores alusivos a la naturaleza del lugar donde se quieren utilizar estas locomotoras y por el contrario con el metanol, no se conocen proyectos que estén puestos en marcha.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

Por medio de la metodología empleada en este trabajo se logró el objetivo principal, el cual consiste en estudiar la factibilidad técnica en la utilización de hidrógeno como fuente energética para locomotoras de carga, específicamente en el norte de Chile, puesto que, se pudo efectuar un análisis en detalle que demostró las grandes cualidades con las que cuenta este combustible, tales como, versatilidad y autonomía debido a su alta densidad energética las que lo convierten en una opción viable de implementar en un futuro próximo, ya que, logra proporcionar cualidades técnicas iguales o superiores a las entregadas por combustibles fósiles, además de contar con una característica primordial para la crisis medioambiental que se vive actualmente, puesto que genera cero emisiones, situación que lo ubica en una posición ventajosa con respecto a los otros combustibles en ese aspecto, para lo cual destaca también uno de sus derivados, el metanol verde, quien tampoco genera emisiones y se pudo analizar como una posible opción en el informe.

Para otorgarle una mayor consistencia a la investigación y posterior análisis, se utilizó como eje principal la flota de locomotoras de la empresa FCAB, mencionado como caso estudio en el informe, donde se aplicaron ciertos cálculos, de los cuales se obtuvieron resultados que permitieron llegar a concluir postulados con respecto al tema. Sin embargo, la mayor dificultad encontrada con respecto a esta tecnología fue relacionado con aspectos económicos, donde se pudo notar que, el costo de llevar a cabo este proyecto es mayor que continuar utilizando diésel como combustible, pero estos costos no son un dato absoluto, considerando que existen factores que podrían disminuirlos, tales como la eficiencia de la celda de hidrógeno, tomando en cuenta que se utilizó una eficiencia del 50% y esta irá aumentando con el paso del tiempo y el desarrollo tecnológico, lo mismo ocurre con el motor a base de metanol, para el cual se utilizó un 60%. Además, los precios asociados a dichos combustibles pueden ser menores a los estipulados en el trabajo de investigación, al contemplar la idea de que la industria del hidrógeno verde tiene un gran potencial de explotación en el país debido a los abundantes recursos renovables con los que cuenta, por lo tanto, sus costos de implementación y desarrollo podrían ser más bajos que los expuestos.

Lo cual posiciona a este combustible verde como un potencial protagonista de la descarbonización en el transporte, siendo una opción bastante factible de concretar.

5.2 Conclusiones específicas

En cuanto a la revisión sobre el contexto nacional e internacional acerca de la utilización de hidrógeno en el transporte se pudo inferir que, si es posible desarrollar transporte impulsado por hidrógeno, tanto para implementarlo en la tecnología de celdas de combustible como en la producción de metano, siendo este considerado como el combustible del futuro, ya que, mundialmente muchos países pretenden llegar a implementarlo y lo están viendo como un objetivo importante de lograr en un futuro próximo. En cuanto a Chile, si bien no se ha mencionado a los trenes específicamente en los proyectos nacionales, el uso de hidrógeno verde en transportes de carga pesada si es considerado como un objetivo a nivel país y también podría considerarse como un proyecto viable, al menos desde el punto de vista de la producción de hidrógeno verde. Además de que la implementación de dicho combustible verde en el transporte tendría un rol importante para lograr las metas que se tienen como país a nivel energético y medioambiental. Y justamente este proyecto será un habilitante para ello, puesto que impulsará el consumo, almacenamiento e instalación de centros de abastecimiento de hidrógeno y metanol en la región, contribuyendo así al desarrollo y logística de estos, lo cual servirá de motivación para el resto del país.

Adicionalmente se logró identificar a los principales actores del sistema ferroviario de carga en el norte del país, donde se indagó acerca de sus funciones, niveles de carga trasladadas y posición que ocupa cada uno en la zona, pudiendo así tener nociones más concretas acerca de la actividad existente en la zona norte a nivel ferroviario y poder identificar las oportunidades existentes para el desarrollo de las tecnologías a base de los combustibles verdes mencionados en el párrafo anterior, en este lugar.

En base a lo mismo, se identificó la empresa FCAB, quien cuenta con un plan de descarbonización por lo cual, se utilizó su flota como caso estudio, teniendo la oportunidad de desarrollar esto desde dentro de la empresa, donde se llegó a la conclusión de que, si es

posible efectuar la transformación de una locomotora diésel a hidrógeno o metanol verde, manteniendo la misma potencia y energía, sin afectar el espacio y la factibilidad en cuanto al mantenimiento y manejo de la locomotora. Además, se pudo notar que el hidrógeno es capaz de proporcionar la misma cantidad de energía que el diésel por menos cantidad de combustible, por lo cual cuenta con una menor demanda siendo esta de 1,2[kg/km], mientras que la del diésel es de 3,6[kg/km] y para el metanol ocurre lo contrario, ya que, su demanda es mayor con 5,3[kg/km], por lo que se debería contar con casi el doble del estanque que se utiliza hoy para el diésel para lograr el mismo nivel de autonomía. Debido a esto el hidrógeno se convierte en una opción muy adecuada para ser el protagonista en este plan de descarbonización, puesto que cuenta con una gran autonomía, que incluso puede aumentar al trasladar mayor cantidad de combustible en las locomotoras. Sin embargo, se debe considerar que este es un servicio de alta montaña donde existen otros factores que aumentan la demanda energética, como la altura, por ende, se debe partir por aquellos servicios que tengan una menor demanda, para luego seguir con la totalidad de la flota y así probar si estos combustibles verdes toleran dichas condiciones ambientales.

Por otro lado, también se pudo estimar la demanda de combustible requerida para lograr abastecer a todo el sistema ferroviario de carga del norte, en caso de que este se una al plan de descarbonización del transporte con sus respectivas flotas, donde se pudo notar que las cifras obtenidas son totalmente asequibles, considerando que según la Estrategia nacional del hidrógeno verde se estima una generación de 200.000 toneladas de hidrógeno anuales para el 2025 y para abastecer al sistema ferroviario del norte sólo se requerirían 22.000 toneladas, lo cual equivale al 11% del total. Lo mismo ocurre con el metanol donde según la empresa Siemens con su proyecto Haru Oni estiman generar alrededor de 590 toneladas de metanol verde para el presente año y sólo se requerirían 94 toneladas para el caso mencionado, lo cual equivale al 16% del total, por consiguiente, efectuar la descarbonización de dicho sistema sería totalmente viable desde la perspectiva que se cuenta con los recursos suficientes para ello a nivel país.

Ahora bien, en cuanto a la relación entre costos y emisiones, si bien el costo de implementar estos combustibles verdes es elevado, el costo de no realizar el cambio puede ser mayor aún, considerando la crisis climática que se está viviendo, la cual se agudiza cada

vez más y el aporte que se realizaría por medio del ahorro de estas emisiones, sería una cifra considerable de aquí al 2050 e incluso sabiendo que el hecho de generar dióxido de carbono también puede tener un costo monetario por medio de un impuesto, el cual ya se aplica en algunos países. Es importante destacar además que, dichos costos podrían ser menores, ya que, el precio del hidrógeno y metanol verde tienen una tendencia a la baja con el pasar del tiempo, puesto que, Chile tiene un gran potencial con respecto a este tema, por lo cual, es muy posible que los valores proyectados en ambos casos, mostrados en la **Figura 19** y **Figura 20**, respectivamente, disminuyan.

Finalmente, luego de comparar ambos combustibles verdes, entre ellos se pudo notar que, la principal desventaja para el metanol sería que es una tecnología en estudio para locomotoras de carga y aún no se ha probado, no así para el caso del hidrógeno. No obstante, su principal una ventaja para este mismo es que se contempla una inversión inicial mucho menor con respecto a la del hidrógeno. Con todo esto se puede inferir en base a todo lo calculado, proyectado y analizado, que ambos candidatos son una opción factible como sucesores del diésel en el transporte ferroviario de carga, pero debe ser un cambio paulatino, tomando en cuenta que es una tecnología nueva para el país.

5.2 Recomendaciones

Dentro de la investigación se trató de abordar la mayor cantidad de factores relacionados tanto a las tecnologías que utilizan estos combustibles verdes, como a los combustibles en sí, sin embargo, por cuestiones de tiempo no se pudo entrar en detalle en ciertos factores medioambientales, como es el caso de la altura considerando las características de la zona, ya que, si bien los cálculos se hicieron en base a las demandas energéticas de la empresa, puede que esto no sea suficiente al momento de llevar a la práctica el proyecto.

Por otra parte, es importante destacar que tal como se mencionó, los costos de estos combustibles se verán influenciados por dos factores, por un lado el avance del desarrollo tecnológico en cuanto a las celdas de hidrógeno, de las cuales se espera que aumenten su eficiencia con el pasar de los años, cosa que implicaría requerir de una menor cantidad de

combustible para suplir con las demandas energéticas y por ende un menor costo de implementación y por otro lado, la tendencia a la baja de los precios de estos combustibles, por ende, se recomienda recalcular estos costos para la fecha actual en la que se encuentre, tomando en cuenta lo mencionado.

Por último, existen otras tecnologías relacionadas, tales como celdas de combustible a base de metanol, producción de amoníaco, entre otras, las cuales también podrían ser de utilidad para el plan de descarbonización del transporte puesto que, son combustibles con cero emisiones, sin embargo, no se abordaron en esta investigación, ya que, no estaban dentro de los objetivos de esta, pero se recomienda investigar acerca del tema, ya que, incluso se tienen proyectos en nuestro país con una de estas tecnologías.

6 Referencias

- [1] Villacorta, A. (2021, 25 octubre). *ONU: la concentración de gases de efecto invernadero superó máximos históricos en 2020*. France 24. Recuperado 3 de mayo de 2022, de <https://www.france24.com/es/medio-ambiente/20211025-concentraci%C3%B3n-gases-efecto-invernadero-onu>
- [2] Department of Energy (DOE), «DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record,» 2016.
- [3] U.S Department of Energy, «Sitio web oficial de The U.S. Department of Energy(DOE)
- [4] Hydrogen Council, «Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition, November,» 2017.
- [5] I. (2020, 25 junio). *Hidrógeno Verde*. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>
- [6] Energy Observer. (2021, 12 enero). *About*. <https://www.energy-observer.org/about>.
- [7] CORDIS | *European Commission*. (s. f.). Comisión Europea. Recuperado 14 de abril de 2022, de <https://cordis.europa.eu/project/id/101006633/es>
- [8] *ESTUDIO DE LA TRACCIÓN FERROVIARIA DE BASE HIDRÓGENO PARA LAS PRESTACIONES DE LA RED CONVENCIONAL ESPAÑOLA*. (2020, junio). https://oa.upm.es/63598/1/TFG_ALEX_DOMINGO_DE_FRANCISCO.pdf
- [9] *Los dos primeros trenes de hidrógeno del mundo completan con éxito su año y medio de pruebas y el proyecto pasa a la siguiente fase*. (2020, 19 mayo). Alstom. <https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2020/5/los-dos-primeros-trenes-de-hidrogeno-del-mundo-completan-con-exito-su>
- [10] Martín, E. (2021, 2 noviembre). *China consigue al fin desarrollar un tren de hidrógeno y lo usa para mover toneladas y toneladas de carbón*. Motorpasión.

- Recuperado 4 de febrero de 2022, de <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/china-consigue-al-fin-desarrollar-tren-hidrogeno-usa-para-mover-toneladas-toneladas-carbon>
- [11] Team, W. (2018, 25 octubre). *India to Work on Methanol-Powered Locomotives – IGP*. IGP. Recuperado 4 de febrero de 2022, de <https://igpmethanol.com/2018/10/25/india-to-work-on-methanol-powered-locomotives/>
- [12] Ministerio de Energía & Gobierno de Chile. (2021, junio). *Estrategia nacional de hidrógeno verde*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/green_h2_strategy_chile.pdf
- [13] COP25 Chile. (2019). *Qué es la COP*. cop25.mma.gob.cl. <https://cop25.mma.gob.cl/que-es-la-cop/>
- [14] Gobierno de Chile. (2020b, abril). *Contribución determinada a nivel nacional de Chile Actualización 2020*. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf
- [15] G. (2021, 26 agosto). *Alianza Energética entre Chile y Alemania*. <https://www.giz.de/En/Worldwide/24902.Html>. <https://www.giz.de/en/worldwide/82695.html>
- [16] Ministerior de Energía. (2015). *Energía 2050, política energética de Chile*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf
- [17] Los Alamos National Laboratory. (2016) Periodic table of elements: LANL. [En línea] Disponible en: <http://periodic.lanl.gov/1.shtml> [Consultado el 16 de septiembre de 2019]

- [18] Energy Efficiency & Renewable Energy. (2019) Dispensing Hydrogen Fuel to Vehicles. [En línea] Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/dispensing-hydrogen-fuel-vehicles> [Consultado el 9 de octubre de 2019]
- [19] David D. Hsu, Cambridge. (2012) Hydrogen. [En línea] Disponible en: <http://www.chemicool.com/elements/hydrogen.html> [Consultado el 15 de septiembre de 2019]
- [20] Martínez, J. (2021, septiembre). *El hidrógeno verde explicado: el combustible que podría dejar a Chile en la vanguardia energética*. Contracarga. <https://contracarga.cl/reportajes/hidrogeno-verde/#:%7E:text=Para%20el%20caso%20chileno%20puntualmente,considerar%20los%20costos%20de%20transporte.>
- [21] Alstom. (2018) Coradia iLint - the world's 1st hydrogen powered train. [En línea] Disponible en: <https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1sthydrogen-powered-train> [Consultado el 17 de diciembre de 2019]
- [22] Mancilla Cofre, M. J. (2021, enero). *ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA EN LA UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO COMO FUENTE ENERGÉTICA EN TRANSPORTE TERRESTRE NACIONAL*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- [23] *Plataforma de Electromovilidad - Componentes de un vehículo eléctrico a hidrógeno*. (s. f.). energia.gob.cl. Recuperado 23 de noviembre de 2021, de 1111
- [24] F. Babir, PEM Fuel Cells: theory and practice, 2013.
- [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] Pérez-Barco, M. J. (2021, 3 septiembre). *El metanol verde reclama su lugar en la ruta de la descarbonización*. abc. Recuperado 7 de febrero de 2022, de https://www.abc.es/economia/abci-metanol-verde-reclama-lugar-ruta-descarbonizacion-202109032327_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Feconomia%2Fbci-metanol-verde-reclama-lugar-ruta-descarbonizacion-202109032327_noticia.html
- [27] *Combustible de metanol*. (2019, 1 abril). HiSoUR Arte Cultura Historia. Recuperado 17 de abril de 2022, de <https://www.hisour.com/es/methanol-fuel-40968/>
- [28] Franco, J. C. (2021, 24 septiembre). *Alemania apoya el metanol verde como forma de luchar contra las emisiones y presenta un Tesla Model Y híbrido*. forococheselectricos. Recuperado 17 de abril de 2022, de <https://forococheselectricos.com/2021/09/alemania-apoya-el-metanol-verde-como-forma-de-luchar-contras-las-emisiones-de-co2.html>
- [29] Singh, A. P., Sharma, Y. C., Mustafi, N. N., & Agarwal, A. K. (Eds.). (2020). *Alternative Fuels and Their Utilization Strategies in Internal Combustion Engines. Energy, Environment, and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0418-1>
- [30] THE METHANOL INSTITUTE. (2019). *Methanol safe handling manual Module 3: Transportation and Storage of Methanol*. https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf [
- [31] GIZ, Fichtner. (2020, abril). *Hidrógeno - cadenas de valor y legislación internacional*. (Vásquez Torres, Ed.). <https://4echile-datastore.s3.eu-central->

1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2021/12/13125456/Cadena-de-valor-H2-y-regulacion-internacional.pdf

- [32] THE METHANOL INSTITUTE. (2019). *Methanol safe handling manual AppendixC: Regulatory, Health, and Safety Information for Methanol*.https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf
- [33] EcuRed. (s. f.). *Locomotora diésel eléctrica - EcuRed*. <https://www.ecured.cu/>. Recuperado 2 de febrero de 2022, de https://www.ecured.cu/Locomotora_di%C3%A9sel_el%C3%A9ctrica#Descripci.C3.B3n_de_una_Locomotora_Di.C3.A9sel
- [34] *Diesel engine working function | #Diesel locomotive | How a diesel locomotive works?* (2020, 25 septiembre). [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=wgHh-JYRlts&list=RDCMUCLgCKWviabKF5dINmgY669g&start_radio=1&t=182s
- [35] *JR-EAST: Research and Development - R&D Themes - Development of a Fuel Cell Hybrid Test Trains*. (s. f.). Jr-East. Recuperado 14 de febrero de 2022, de <https://www.jreast.co.jp/E/development/theme/energy/energy04.html>
- [36] Subsecretaría de transporte. (s. f.). *Departamento de Transporte Terrestre (ex Ferroviario)*. Desarrollo logístico. Recuperado 22 de abril de 2022, de <http://www.logistica.mtt.cl/areas/4/departamento-de-transporte-terrestre-ex-ferroviario>
- [37] *TREN CON PILA DE HIDRÓGENO*. (2017, 4 julio). [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=_C32MEsU1w

- [38] *Coradia iLint™ – the world's 1st hydrogen powered train*. (s. f.). Alstom. Recuperado 23 de febrero de 2022, de <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilinttm-worlds-1st-hydrogen-powered-train>
- [39] *HyPM HD 180 - Hydrogenics - Catálogo PDF | Documentación técnica | Brochure*. (s. f.). Hydrogenics. Recuperado 1 de abril de 2022, de <https://pdf.directindustry.es/pdf-en/hydrogenics/hypm-hd-180/33492-420321.html>
- [40] Jørn Helge Dahl, Global Sales Director. (2022, 19 mayo). *Hexagon Purus - a Hexagon Composites company*. HEXAGON PURUS. Recuperado 04–05, de <https://www.innovasjon Norge.no/contentassets/75fc12bea8674affbdaae9c12ef3e0c7/3-5-hexagon.pdf>
- [41] *AKASystem OEM PRC | AKASOL - Battery Systems*. (s. f.). Akasol. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://www.akasol.com/en/akasystem-oem-prc>
- [42] FCAB. (s. f.-a). Locomotora GR12-U N°1400-1409 [Fotografía]. En *Locomotora 1400–1409* (FCAB ed.).
- [43] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Thermodynamics : An Engineering Approach, 7th Edition by Yunus Appendix 1: Table A-27; Boles, Michael Cengel (2010) Hardcover*. McGraw-Hill Education.
- [44] College of Desert, «Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Module 1: Hydrogen Properties,» 2001.
- [45] THE METHANOL INSTITUTE. (2019). *Methanol safe handling manual Module 8: Methanol Incidents and Safeguards*. https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf

- [46] College of Desert, «Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Module 6: Fuel Cell Engine Safety,» 2001.
- [47] THE METHANOL INSTITUTE. (2019). *Methanol safe handling manual Module4: Health and safety*. https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf
- [48] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Thermodynamics : An Engineering Approach, 7th Edition by Yunus Chapter9:Gas Power cycle; Boles, Michael Cengel (2010) Hardcover*. McGraw-Hill Education.
- [49] THE METHANOL INSTITUTE. (2019). *Methanol safe handling manual Module9: Environmental Protection*. https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf
- [50] Ministerio del medio ambiente & Ministerio de energía. (2020, 9 abril). *NDC y Plan de carbono neutralidad 2050*. Ministerio de medio ambiente. Recuperado 27 de abril de 2022, de https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/20200407_Ministro-Jobet_NDC_V5.pdf
- [51] *Precio del Hidrógeno*. (2021, 9 marzo). Hidrogeno verde. Recuperado 27 de abril de 2022, de <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>
- [52] *Ripe for green methanol*. (s. f.). Siemens-Energy.Com Global Website. Recuperado 27 de abril de 2022, de <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2020/universal-e-fuel-hubs.html>
- [53] Robaina, E. (2020, 28 enero). *¿Qué hacen los países para reducir sus gases de efecto invernadero?* Climática. Recuperado 16 de mayo de 2022, de

<https://www.climatica.lamarea.com/paises-reducir-emisiones-gases-efecto-invernadero/>

[54] *Emisiones de CO2 2020*. (s. f.). datosmacro.com. Recuperado 16 de mayo de 2022, de

<https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2>

[55] *Objetivo 55*. (2022, 3 junio). European Council. Recuperado 6 de junio de 2022, de

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

[56] Villegas, C. I. (2022, enero). *Análisis de los factores de emisión y consumo energético*

de los modos del sector transporte en el periodo 2020–2050. Universidad Federico

Santa María.