

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**ESTUDIO DEL USO DE HIDRÓGENO VERDE COMO COMBUSTIBLE
SUSTITUTO EN CAMIONES DIÉSEL, PARA LA MITIGACIÓN DE GEI
ANTROPÓGENOS.**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
INGENIERO EN EJECUCIÓN
MECÁNICA DE PROCESOS Y
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumnos:

Mauro André Apablaza Puelle

Rodrigo Esquivel Cornejo

Profesor Guía:

Mg. Ing. Alejandro Badilla

Profesional Correferente:

2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Dios por lo que ha significado en mi vida, todo lo que me ha entregado y aprendido bajo su manto. Además, agradezco a mis compañeros, amigos, familia y pareja que siempre han estado a mi lado para apoyarme y sacarme una sonrisa cuando más falta me hace.

En especial dedicación a mi padre, que del cielo me ilumina a seguir adelante sacando la mejor versión de mí. Y a mi madre Ximena, que ha sido un pilar fundamental en mi vida, brindándome de la formación, educación, valores y amor que me definen hoy como persona, siendo un apoyo incondicional en mi vida, ayudándome a continuar adelante en los momentos más difíciles.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, quienes desde el principio me han brindado su apoyo, amor y valiosos valores. Así mismo, quiero agradecer al regalo más grande que Dios me pudo entregar, mi hija Isabella, quien es mi fuerza impulsora. Mi inspiración para salir adelante y poder ofrecerle siempre lo mejor.

Quisiera destacar especialmente a mi madre Karla, mi pilar, cuyo apoyo incondicional, enseñanzas y sacrificio fueron fundamentales para forjar la persona que soy en la actualidad, le debo todo a ella. También quiero agradecer a mi abuela, quien desde la distancia sigue guiándome para entregar lo mejor de mí en cada meta que persigo, aunque no estés físicamente para presenciar mi camino, siempre serás una parte esencial de quien soy.

RESUMEN

Frente a la crisis climática actual que enfrenta el planeta, resulta crucial descubrir alternativas que ayudan a mitigar los efectos ambientales causados por las emisiones de gases de efecto invernadero. El hidrógeno verde, emerge como una solución que contribuirá al objetivo de que Chile alcance la neutralidad de carbono reduciendo 65 millones de toneladas para el año 2050, mencionado en la estrategia nacional del hidrógeno verde al transporte de carga como uno de los mercados potenciales más grande.

El parque vehicular de transporte de carga terrestre utiliza principalmente combustible diésel para el funcionamiento de sus flotas, registrando en el país un total aproximado de 50.000 tractocamiones y 156.000 camiones rígidos, según los registros de permisos de circulación del INE, lo que conlleva a un consumo de combustible de 4.412 millones de litros de diésel al año. También, se recopilaron todos los registros anteriormente mencionados de la plataforma, estableciendo una tendencia, que demostró ir al alza con el paso del tiempo, generando proyecciones de la demanda de combustible diésel al año 2050.

Utilizando la metodología que establece las directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de GEI equivalente, en su capítulo 3 de combustión móvil, se determinó la huella de carbono que produce los vehículos, significando la generación de 12.017 [kT] al año de CO_{2eq}, representando el 42% de las emisiones del transporte terrestre total del país.

Se considero dos tecnologías que ya han recibido financiamiento de la CORFO para la implementación de este combustible. La primera, consiste en motores de combustión dual, utilizando una fracción de diésel (40%) y la otra parte de hidrógeno (60%) reduciendo la cantidad de emisiones, presentado la ventaja de reacondicionar el parque vehicular ya existente. Por otra parte, tenemos los vehículos de celda de hidrógeno (FCEV), que funciona con motores eléctricos usando el hidrógeno como fuente de energía eléctrica.

Se ha establecido en base a una consultoría la implementación de las tecnologías en el parque vehicular, realizado por un equipo de la UTFSM en coordinación con el Ministerio de Obras Públicas y financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo. Considera dos niveles de penetración de hidrógeno en camiones pesados, determinando un escenario optimista y pesimista para el año 2050. El escenario optimista, implementa la utilización del hidrógeno verde en el 50% de los vehículos de carga. Mientras que, en el escenario pesimista, el uso de este combustible va a abarcar el 10% de los vehículos.

Señalado lo anterior, se procede a constituir la demanda del hidrógeno de acuerdo con los parámetros preestablecidos, realizando las primeras estimaciones al año 2035, período en que la estrategia nacional del hidrógeno verde programó la finalización de los

proyectos piloto. Según la equivalencia energética, se tomó en cuenta las características de las tecnologías y eficiencias asociadas, calculando una demanda de hidrógeno para el año 2035 desde los 115,42 [kt] para la implementación de la combustión dual del escenario pesimista, hasta 923 [kt] en los vehículos FCEV del escenario optimista, evaluando cada cinco años, esperando que para el año 2050 se estima la demanda de 149,35 [kt] y 1195 [kt] respectivamente. Con lo anterior, fue posible evidenciar la disminución del consumo del diésel, directamente relacionado con la producción GEI, demostrando que la contribución a la meta de descarbonización equivaldría a un 2,10% en la combustión dual y 3,49% para FCEV en el escenario pesimista. En cambio, para el caso optimista se pronostica una reducción de 10,48% en la mezcla de combustible y 17,47% para FCEV, del total de la meta el año 2050.

Con la finalidad de llevar a cabo la implementación, se analiza los requerimientos de los aspectos técnico y económico de la cadena de valor del hidrógeno verde. Enfatizando en los insumos, producción y almacenamiento, que se elabora a partir de un proceso de electrólisis, la que implica la utilización de agua y energía eléctrica. El recurso hídrico se obtendría a partir de desaladoras de agua de mar a libre disposición. En cuanto a la electricidad, se considera la instalación de una planta eléctrica in situ, evaluando dos alternativas de producción de energía limpia, que corresponde a una planta solar fotovoltaica ubicada en la comuna de Calama y un parque eólico situado en la región de Magallanes.

Para establecer el valor del combustible o coste nivelado del hidrógeno, se recurrió a la propuesta de Julien Armijo, miembro de la Internacional Energy Agency (IEA), quien considera las distintas variables financieras de un proyecto para definir un costo por kilogramo de hidrógeno verde, teniendo en cuenta la venta de oxígeno como un subproducto del proceso. Se contemplan la mayor demanda de cada escenario H2V calculados al año 2050, evaluando cada caso, resultando en un costo de 3,38 [USD/kg] y 2,26 [USD/kg] para la producción fotovoltaica y la producción eólica respectivamente. No obstante, para el año 2050 el diésel se valora en 3,17 [USD], mientras que el H2 costaría alrededor de 2,4 [USD], siendo más competitivo que su contraparte por la característica y el precio. Además, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros que influye en el costo del H2V.

Por último, se determinó las características técnicas de 3 vehículos de transporte de carga con características similares, con las distintas tecnologías estudiadas. Donde se compararon los rendimientos, consumo de combustible, potencia y rendimiento energético para un tractocamión que recorre 120.000 kilómetros anuales. Además, se llevó a cabo un flujo de caja para evaluar económicamente la implementación de estas tecnologías en la industria del transporte, comparando sus indicadores económicos, tales como el VAN, TIR, TMAR, TCO y payback. Destacando en los resultados la tecnología de combustión dual, como la opción más factible y sustentable dentro de las alternativas estudiadas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPITULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	3
1 ESTADO DEL ARTE	4
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	4
1.1.1 Situación nacional	5
1.2 HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE DEL FUTURO.	6
1.2.1 Generación de hidrógeno.	8
1.3 ESTRATEGIA NACIONAL DEL HIDRÓGENO.....	9
1.3.1 Potencial energético	10
1.3.2 Proyecciones del desarrollo	11
1.3.3 Plan de acción	13
1.4 INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.....	13
1.4.1 Motores de combustión dual diésel – Hidrógeno.....	15
1.4.2 Vehículos celda de hidrógeno	15
1.5 RENDIMIENTO ENERGÉTICO	17
1.6 EMISIONES DEL TRANSPORTE.	18
1.7 METAS CARBONO NEUTRAL.	19
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	21
2 DIRECTRICES DEL IPCC PARA LOS INVENTARIOS NACIONALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	22
2.1 ESTIMACIÓN DE EMISIONES.....	22
2.1.1 Estimaciones de CO ₂	22
2.1.2 Estimaciones N ₂ O y CH ₄	25
2.2 DEMANDA ENERGÉTICA	27
2.3 PROYECCIONES DE DEMANDA	28
2.4 ESTIMACIONES DE EMISIONES GEI	29
2.5 MITIGACIÓN DE GEI META 2050.....	34
CAPITULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA	35
3 EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA.....	36
3.1 CADENA DE VALOR	36

3.2	INSUMOS	36
3.2.1	Recurso hídrico	37
3.2.2	Energía	38
3.3	PRODUCCIÓN	41
3.4	ALMACENAMIENTO	42
3.5	CÁLCULO DE COSTO DE PRODUCCIÓN (LCOH).....	45
3.6	COSTOS ASOCIADOS	47
3.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	48
3.8	COMPETITIVIDAD DEL LCOH CALCULADO	51
3.9	COSTOS IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA.....	52
3.10	COMPLEMENTO FINANCIERO	55
3.11	INCENTIVOS TRIBUTARIOS PARA EL DESARROLLO DEL H2V	56
	CONCLUSIÓN	57
	ANEXOS	60
	BIBLIOGRAFÍA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Anomalías de temperatura anuales desde 1880 hasta 2019.	5
Figura 1-2. Emisiones de GEI transporte por componente, serie 1990-2018.	6
Figura 1-3. Datos técnicos del Hidrógeno.....	7
Figura 1-4. Generación mundial del hidrógeno en el año 2020.	8
Figura 1-5. Proyección de la demanda global de energía suministrada con hidrógeno...10	
Figura 1-6. Costos del hidrógeno de los sistemas híbridos solares fotovoltaicos y eólicos a largo plazo.	10
Figura 1-7. Proyección de costos de electricidad renovable e hidrógeno verde.	11
Figura 1-8. Proyecciones de desarrollo en aplicaciones del hidrógeno verde.	12
Figura 1-9. Programación de aplicaciones e influencia en el mercado.	12
Figura 1-10. Esquema referencial camiones FCEV.....	17
Figura 1-11. Eficiencia de tecnología en camiones.	18
Figura 1-12. Emisiones de GEI transporte por componente, serie 1990-2018	19
Figura 1-13. Metas de carbono neutralidad 2050.....	20
Figura 2-1. Consumo diésel.	31
Figura 2-2. Proyecciones de CO ₂ equivalente	33
Figura 2-3. Proyecciones de emisiones de CO ₂ en distintos escenarios.....	34
Figura 3-1. Cadena de valor del hidrógeno verde	36
Figura 3-2. Irradiación promedio horaria.....	39
Figura 3-3 Irradiación promedio mensual.....	39
Figura 3-4. Factor de planta eólico en región de Magallanes.	40
Figura 3-5. Diagrama de fase del hidrógeno.....	42
Figura 3-6. Compresión del hidrógeno en multietapas a 25°C.	43
Figura 3-7. Factor de compresión.	44
Figura 3-8 Detalle LCOH.....	47
Figura 3-9. Análisis de sensibilidad para el costo de la electricidad	49
Figura 3-10. Análisis de sensibilidad para el factor de planta	49
Figura 3-11. Análisis de sensibilidad de eficiencia de electrolizador	50
Figura 3-12. análisis de sensibilidad de CAPEX	50
Figura 3-13. Proyecciones precio de combustibles.....	51
Figura 3-14. Precio consumidor anuales Chile diésel [USD/l].....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Potencial de calentamiento global. 5

Tabla 2-1. Factor de emisiones CO₂ 25

Tabla 2-2. Factor de emisiones N₂O y CH₄.....27

Tabla 2-3. Consumo anual diésel 2018. 30

Tabla 2-4. Emisiones de CO₂ 2018. 31

Tabla 2-5. Emisiones de N₂O y CH₄ 2018. 31

Tabla 2-6 . CO₂ Equivalente N₂O y CH₄ 2018. 32

Tabla 2-7. CO₂ Equivalente 2018. 32

Tabla 2-8. Demanda de hidrógeno en distinto panoramas. 33

Tabla 2-9. Escenario de mitigación GEI 2050. 34

Tabla 3-1. Proyección de agua requerida para producción de hidrógeno 37

Tabla 3-2. Proyección de costos planta desaladora según producción. 38

Tabla 3-3. Proyección de requerimiento energético para la electrólisis. 38

Tabla 3-4. Potencias nominales de planta fotovoltaica en Calama. 40

Tabla 3-5. Potencias nominales de parque eólico en región de Magallanes. 40

Tabla 3-6. Comparación de electrolizadores alcalinos y PEM 41

Tabla 3-7. Comparación de cálculos de producción según escenarios 42

Tabla 3-8. Detalle de puntos de presión y temperatura relevantes 43

Tabla 3-9. Volumen de hidrógeno para la demanda estimada. 44

Tabla 3-10. Clasificación de tipos de estanques. 45

Tabla 3-11. Parámetros de la Ecuación 3-3 para escenarios y tecnologías.....46

Tabla 3-12. Comparación de distintos resultados de LCOH. 48

Tabla 3-13. Equivalencia de combustibles.....52

Tabla 3-14. Comparación de tecnologías para los tractocamiones 52

Tabla 3-15. Indicadores económicos.....55

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 2-1. Árbol de decisión para las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles en los vehículos terrestres. 23

Esquema 2-2. Árbol de decisión para las emisiones de CH₄ y N₂O de los vehículos terrestres. 26

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1. Demanda de combustible.....23

Ecuación 2-2. Emisiones de CO₂ equivalente.....24

Ecuación 2-3. Emisiones de N₂O y CH₄. 26

Ecuación 2-4. Hidrógeno requerido. 28

Ecuación 3-1.Ecuación de gas ideal con factor de compresión 44

Ecuación 3-2. Volumen específico con factor de compresión.....44

Ecuación 3-3. Coste nivelado del hidrógeno (LCOH). 46

Ecuación 3-4. Factor de recuperación de capital requerido. 47

Ecuación 3-5. Equivalencia energética de combustibles. 51

Ecuación 3-6. Costo combustible.....53

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

GEI - Gases Efecto Invernadero.

ONU – Organización Naciones unidas.

CCPI- climate change performance index.

BEV - Battery Electric Vehicle.

PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle.

FCEV - Fuel cell electric vehicle.

CORFO- Corporación de Fomento de la Producción.

CAC - captura y almacenamiento de CO₂

PEM - Electrólisis de membrana de intercambio de protones.

SOEC – Electrolizador de oxido sólido.

DRI - Direct Reduced Iron.

FE – Factor de emisiones.

PIB – Producto interno bruto.

OMS Organización mundial de la salud.

IPCC - El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

MINSAL – Ministerio de Salud.

APL – Acuerdo de producción limpia.

INE – Instituto nacional de estadísticas.

AChEE - Agencia chilena de la eficiencia energética.

PCG - Potencial de calentamiento global.

OLADE - Organización latinoamericana de energía.

CMNUCC - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

NASA - National Aeronautics and Space Administration.

GISS - Goddard Institute for Space Studies.

USD – Dólar estadounidense.

COVNM - Compuestos orgánicos volátiles no metánicos.

NDC - Nationally Determined Contribution.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammen- arbeit.

UTFSM – Universidad Técnica Federico Santa María.

IDPC – Impuesto de primera categoría.

EIA – Evaluación de impacto ambiental.

Kg – Kilogramo.

Cal – Calorías.

NH₃ – Amoníaco.

KOH – Hidróxido de potasio.

NaOH – Hidróxido de sodio.

Mtoe - Megatoneladas equivalentes de petróleo.

H₂O – Agua.

H2V – Hidrógeno Verde.

CO₂ – Dióxido de carbono.

CH₄ – Metano.

N₂O – Óxido nitroso.

O₃ – Ozono.

VAN – Valor actual neto.

TIR – Tasa interna de retorno.

TMAR – Tasa media anual de reducción.

Payback - Período de recuperación.

TCO – Coste total de propiedad.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, hemos presenciado un aumento significativo en el parque vehicular a nivel mundial. La creciente demanda ha conllevado el uso extensivo de combustibles fósiles en la generación de energía, lo que ha contribuido a la incrementación de las emisiones de gases efecto invernadero. Entre los vehículos que presentan un mayor consumo de combustible por kilómetro recorrido se encuentran los camiones de carga terrestre, que aportan considerablemente al aumento de la temperatura del planeta, afectando al ecosistema y la calidad de la vida de las personas.

Debido al cambio climático, que en parte se debe a la quema de estos combustibles fósiles, la comunidad internacional se ha puesto de acuerdo para cambiar el panorama energético global y buscar otros medios más sostenible y amigable con el medio ambiente. En este contexto, resaltan las características del hidrógeno verde que se ha convertido en una importante alternativa limpia, que se produce a partir de agua de mar y energía eléctrica renovable, libre de emisiones de carbono.

Examinando el caso de Chile, se ha posicionado como uno de los candidatos mundiales prometedores para la producción de hidrógeno verde, debido a sus recursos naturales y costos competitivos. Se busca analizar el potencial en la implementación de este combustible en el transporte de carga terrestre a través del tiempo.

Recopilando las cualidades, proyectos, estrategia y metas que ha adoptado el país en su camino a la generación de este prometedor combustible, se consideran los distintos escenarios y tecnologías vehiculares. Evaluando el impacto potencial de la sustitución del diésel en camiones, se tiene en cuenta las características técnicas de ambos combustibles, estimando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, según estándares internacionales y el aporte que proyectan a la meta de carbono neutralidad al año 2050.

Mediante la cadena de valor y sus diferentes procesos, se realiza un análisis de los aspecto técnico y económico relevantes para evaluar la sustentabilidad del hidrógeno verde en el país. Además, se estima el precio por kilogramo de este combustible limpio y se compara con las proyecciones que se espera para el diésel, observando la evolución de la competitividad en los camiones, comprendiendo las características y el potencial del Estado como productor del hidrógeno verde, evaluando si es posible la transición hacia una economía en torno a este mercado.

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la reducción de emisiones de GEI en camiones de carga diésel, por medio de la demanda energética requerida del parque vehicular, distinguiendo el impacto de la implementación del hidrógeno verde en el cumplimiento de la meta carbono neutral al 2050.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estimar el desarrollo del hidrógeno verde en el país, por medio de su estado del arte para la implementación del transporte de carga terrestre.

Calcular el impacto de la transición del diésel a hidrógeno verde en camiones, conforme con las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI equivalente, identificando la reducción de emisiones al año 2050.

Analizar los requerimientos de la demanda de hidrógeno verde, considerando los aspectos técnicos y económicos de la cadena de valor, determinando si la implementación de un tractocamión es sustentable al mercado.

CAPITULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 ESTADO DEL ARTE

En el apartado se investigará la documentación que respecta al hidrógeno verde en Chile, haciendo una revisión de la crisis climática actual, los compromisos internacionales, las características de este elemento y cuál ha sido la estrategia que ha adoptado el país para el desarrollo del hidrógeno. Además, se explorarán iniciativas de innovación tecnológica en la que el gobierno ya ha contribuido, con un enfoque en la implementación del transporte de carga terrestre, distinguiendo sus eficiencias energéticas y el aporte que tendría el hidrógeno verde en las metas de carbono neutralidad al año 2050.

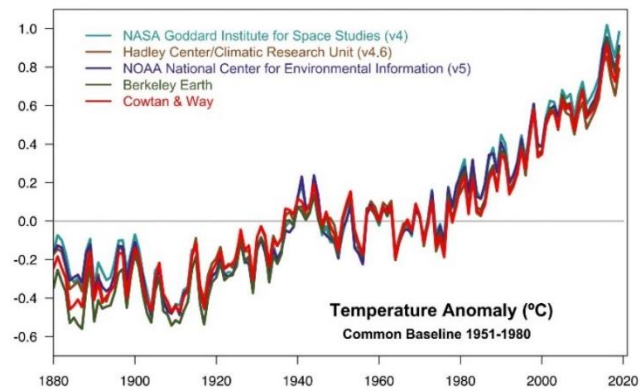
1.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Desde el siglo XIX, se ha empezado a evidenciar cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos, siendo las actividades humanas el principal motor de esto, a pesar de que puede darse de forma natural, por ejemplo, a través de las variaciones del ciclo solar. Principalmente, se ha debido a la quema deliberada de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. La que ha permitido una liberación de gases de efecto invernadero (GEI), que se van acumulando en la atmosfera, produciendo la absorción de energía infrarroja.

La preocupación de las distintas naciones se ha ido incrementado, por lo que en 1992 en la CMNUCC tuvieron que definir a que se estaban enfrentando. Entendiendo como efectos adversos del cambio climático, los cambios en el medio ambiente físico que tienen efectos nocivos significativos en los ecosistemas naturales o en el funcionamiento de los sistemas socio económicos, la salud y el bienestar humanos.

Este principal problema se da por los GEI mencionados anteriormente, que pueden ser producido de forma natural o antropógeno. Se reconoce los gases de efecto invernadero primarios compuesto por el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). Además, la atmósfera contiene cierto número de gases enteramente antropógenos, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo [1] .

Los gases actúan como una manta que envuelve la tierra, atrapando el calor del sol y elevando las temperaturas (efecto invernadero), significando para el planeta tierra un aumento aproximado de la temperatura de 1,15 grados centígrado a partir del siglo XIX como lo refleja la Figura 1-1, según datos de la NASA.



Fuente: NASA GISS / Gavin Schmidt

Figura 1-1. Anomalías de temperatura anuales desde 1880 hasta 2019.

Para cuantificar y comparar el aporte de los diferentes gases a este aumento de temperatura, hay que considerar el potencial de calentamiento global (PCG). El que se basa en la capacidad de un gas para absorber la radiación infrarroja y su vida útil en la atmósfera, expresándose como un valor que contribuye al calentamiento global en relación con el CO₂, que se considera el gas de referencia con un PCG 1. Por ende, cuanto mayor sea el PCG que produce un gas, mayor será su capacidad de retención en la atmósfera.

A continuación, en la Tabla 1-1 se observa los PCG de los gases más significativos para el estudio.

Tabla 1-1. Potencial de calentamiento global.

GEI	Duración en la atmósfera	Potencial de calentamiento global (SIE ⁽¹⁾ 100-años)
Vapor de Agua H ₂ O	Par de días	---
Dióxido de carbono CO ₂	Variable	1
Metano CH ₄	12 años	21
Óxido nitroso N ₂ O	114 años	310

(1) SIE se refiere al Segundo Informe de Evaluación del IPCC (1995) utilizado para informar ante la CMCC.

Fuente: Informe intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

El PCG está estrechamente relacionado con el cambio climático, siendo el principal propulsor de los efectos adversos. De continuar a este ritmo, conllevará a una alteración de patrones climático, aumento de temperatura, elevación de marea, impacto en la biodiversidad y un impacto en la producción agropecuaria.

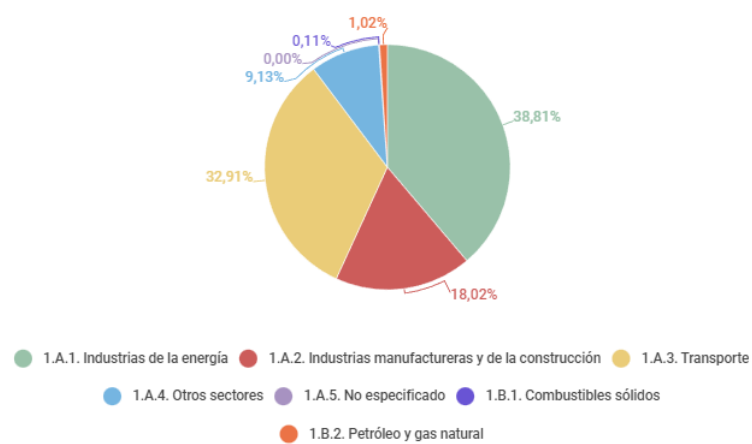
1.1.1 Situación nacional

Chile no estando exento de esta problemática, ha sido el responsable de la producción del 0,25% de las emisiones globales, cumpliendo con 7 de 9 de las condiciones de vulnerabilidad definidas por la ONU.

Aunque el país es mundialmente reconocido por las acciones para proteger el cambio climático, ponderándose en el puesto 6 del ranking “Climate Change Performance

Index 2023”, subiendo tres puestos en comparación al año anterior. Se mantiene entre los países de alto desempeño con 2.24 tCO_{2eq} emisiones anuales per cápita, cabe recalcar que en este ranking ningún país fue reconocido del primer al tercer puesto [2].

En 2018, las emisiones de GEI totales del país llegaron a las 112.313 [ktCO_{2eq}], incrementándose en un 128 % desde 1990. Los principales causantes de la tendencia de emisiones de GEI totales, se da por la industria de la energía, manufacturas y del transporte, como lo indica la Figura 1-2. Esto es debido a la quema de combustibles fósiles para satisfacer la generación eléctrica y el transporte terrestre [3].



Fuente: Equipo Técnico de Energía del Ministerio de Energía
Figura 1-2. Emisiones de GEI trasporte por componente, serie 1990-2018.

Bajo este panorama, Chile adopto en 2020 un Marco de Cambio Climático Ley que compromete al país a ser carbono-neutral al 2050, involucrando por una parte a la sociedad y a su economía para el cumplimiento de estos objetivos. Uno de los principales objetivos es tratar la forma con la que se produce energía, debido a que tres cuartas partes de las emisiones GEI del planeta corresponde a este sector. Sin embargo, aún carece de recursos adicionales para descarbonizar algunos sectores y soluciones que cumplan con costo-eficientes, confiable y accesibles para todos.

1.2 **HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE DEL FUTURO.**

El hidrógeno como elemento es uno de los más abundantes en el universo, lo podemos encontrar primero en la tabla periódica con su particular único número atómico y sus características específicas representado en la Figura 1-3. En la naturaleza está presente en el 75% de la materia combinado con otros elementos como oxígeno y carbono, presentándose en condiciones normales por ser limpio, insípido, incoloro e inodoro.

Es un gas bastante simple, ya que puede darse de manera diatómica en su composición, contando únicamente de dos átomos de hidrógeno (H₂). La densidad energética que contiene este gas es de 33,33 [kWh/kg], alrededor de tres veces mayor al compararse con una densidad energética de otras fuentes energéticas, como el diésel igual

a 11,94 [kWh/kg] y 12 [kWh/kg] de una batería de litio. Presentándose como un combustible innovador para el avance en la descarbonización del planeta, ya que, se encuentra a gran escala en el planeta ligado a otro elemento químico.

Dentro de las desventajas a la que actualmente se enfrenta, es la eficiencia del 76% del proceso de electrólisis, produciendo hidrógeno a partir de 8,9 [litros] de agua, con aproximadamente 50 [kWh] de energía eléctrica, obteniendo 1 [kg] de hidrógeno y 8 [kg] de oxígeno. Por otra parte, es necesario confinar el elemento bajo presión y a temperaturas controladas, teniendo en consideración su densidad, ya que al estar en estado gaseoso y presión atmosférica su valor energético es bajo en comparación a otros combustibles, como ejemplo, para confinar 1[kg] de H₂ a 700 [bar] sería necesario 20 [litros] de volumen, comparado a un kilo de diésel que ocuparía 3 [litros] de volumen o 6 [litros] de gas natural a la misma presión. Dada la particularidad de este gas, resultaría más sencillo licuarlo sometiénolo a temperaturas baja y así transportarlo de manera eficiente, no obstante, su punto de licuefacción es a los -253[°C], lo cual requiere cerca del 50% de energía que produce un kilogramo, como también el control para transportarlo y mantener su estado líquido.

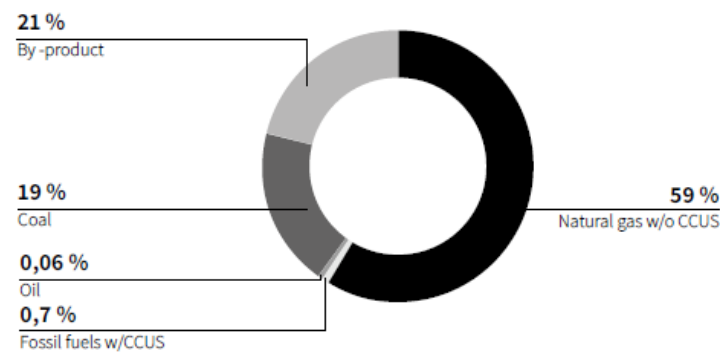
DATOS TECNICOS RELEVANTES DEL HIDRÓGENO			
Propiedades Físicas		Densidad gas (20°, 1atm)	0.0899 kg/Nm³
		Densidad líquido (-293°C)	0.0708 kg/L
		Punto de ebullición	20.28 kelvin
		Punto de fusión	14.02 Kelvin
Densidad energética	MJ	PCS (másico)	141.86 MJ/Kg
		PCI (Másico)	120 MJ/kg
		PCI Gas	10.8 MJ/Nm³
		PCI Liquido	8.5 MJ/l
	KWh	PCS (másico)	39.4 kWh/Kg
		PCI (másico)	33.3 kWh/kg
		PCI Gas (20º, 1 atm)	3.0 kWh/Nm³
		PCI Liquido (-293°C)	2.4 kWh/l
Combustión y explosión		Límites de explosión	4 - 75 % H ₂ en el aire
		Límites de detonación	18,3 – 59 % H ₂ en el aire
		Temp. combustión espontánea	585 ° Celsius
Termodinámica y difusión		Cp	14.3 J/(kgK)
		Cv	10.1 J/(kgK)
		Coeficiente de difusión	0.6 cm²/s
Incoloro, inodoro e insípido No es tóxico, ni contaminante, ni corrosivo, ni cancerígeno, ni radiactivo No es explosivo, ni tiene auto ignición, ni se descompone Es más ligero que el aire y se diluye rápidamente hacia arriba Tiene una llama prácticamente invisible			

Fuente: Informe OBS.

Figura 1-3. Datos técnicos del Hidrógeno.

1.2.1 Generación de hidrógeno.

Es necesario saber que hay distintas maneras de producir hidrógeno, ya sea por sus materias primas o su recurso energético como energías renovables, combustibles fósiles o en combinaciones, como se observa en la Figura 1-4. La producción del hidrógeno a gran escala aún presenta desafíos técnicos y económicos, con necesidad de reducir sus costos y mejorar la eficiencia del proceso para transformarse en una fuente sostenible y limpia.



Fuente: Informe OBS.

Figura 1-4. Generación mundial del hidrógeno en el año 2020.

Según su forma de ser producido y por su emisión de GEI dan lugar a la nomenclatura de este hidrógeno, estos pueden ser de distintos colores para identificarlos. Hay que considerar que estos términos se han utilizado en algunos contextos para referirse a las diferentes características y propiedades.

- Hidrógeno negro o marrón: Conocido por ser el más contaminante de todos los tipos de hidrógenos, ya que utiliza carbón mineral.
- Hidrógeno gris: Se produce a base del reformado de combustibles fósiles, como gas natural, este hidrógeno es el más barato de producir por esto es el más utilizado actualmente, produciendo CO₂ en su fabricación.
- Hidrógeno azul: Se fábrica de la misma manera que el hidrógeno gris, pero en el proceso se captura el CO₂ para ser inyectado y almacenado bajo tierra en lugar de liberarlo a la atmósfera (elevando su precio).
- Hidrógeno rosa o magenta: Este se fabrica por medio de electrólisis, con energía eléctrica producida por fisión nuclear.
- Hidrógeno verde: Fabricado por medio de electrólisis con energías renovables, descomponiendo con electrodos la molécula de H₂O en una de oxígeno y dos de hidrógeno. A pesar ser unos de los menos utilizados, últimamente ha tomado popularidad gracias a que es el más amigable con el medio ambiente por emitir ningún GEI en su elaboración ni en su uso.

Considerando esta última como una de las alternativas para el país y su descarbonización, según la estrategia nacional del hidrógeno verde. El proceso de electrólisis puede ser realizada de múltiples maneras, de las cuales se distinguen la

electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM), electrolizador alcalino y electrolizador de óxido sólido (SOEC).

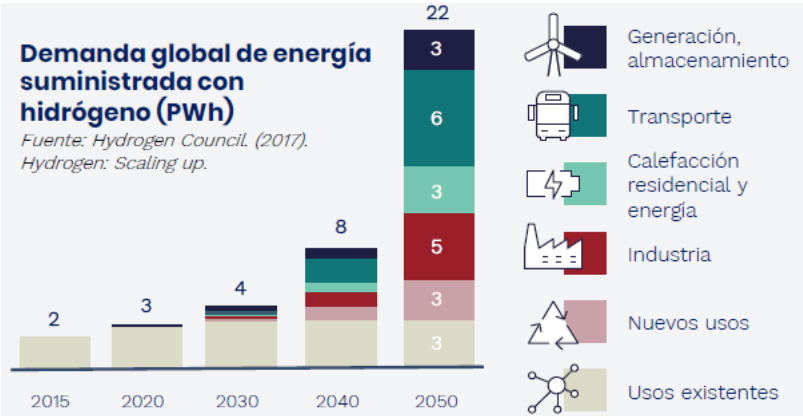
1.3 ESTRATEGIA NACIONAL DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno ha estado en estudio varias décadas como el elemento en la transición energética, debido a su fundamental impacto en la sustitución de combustibles para la reducción de la contaminación local. Por lo que, el país empezó a tomar acciones en el último gobierno del expresidente Sebastián Piñera, creando el decreto 44 del Ministerio de Energía, donde se crea comisión asesora ministerial para la elaboración de la estrategia nacional de hidrógeno verde. Observando a este elemento como una oportunidad de diversificar el desarrollo económico, que actualmente existe en Chile. Un estudio realizado por “Statista Research Department”, en el año 2021, muestra que la industria de la minería y la madera abarcaron aproximadamente un 14,6% del Producto Interno Bruto (PIB) y más del 50% de las exportaciones [4].

Uno de los primeros objetivos que se plantearon en las mesas técnicas fue la descarbonización nacional como meta en el año 2050, cumpliendo con el objetivo internacional de mitigar el cambio climático. De manera global, el hidrógeno se ha convertido en un elemento capaz de combatir el fenómeno de las emisiones de gases antropógenos, para la generación de energía. Siendo Chile uno de los pocos países con metas claras y en vías de desarrollo hacia el carbono neutralidad y la acción climática, tramitando una ley macro de cambio climático (Ley Marco de Cambio Climático No. 21.455).

Para el cumplimiento de los objetivos será necesario transformar acciones en la sociedad y su economía, como también la forma en la que la energía se consume actualmente. Hace algunos años, Chile, ya había iniciado una ruta hacia la eficiencia energética y a la electrificación usando energías renovables, no obstante, fue necesario de otras opciones para alcanzar la demanda en sectores en los que la red eléctrica no es eficiente, confiable, accesible o factible. Ahí es cuando el hidrógeno aparece para cumplir estos objetivos, si bien es cierto que se ha generado históricamente, la manera de producirlo siempre ha sido a partir de combustibles fósiles emitiendo gases de efecto invernadero en el proceso.

Teniendo en cuenta las características de este elemento, la estrategia asume que será el protagonista en la transición energética y productiva. Esto significa que las proyecciones de la sustitución llevarán a cabo disminuciones en el costo de las energías renovables y de la electrólisis, ya que, como se grafica en la Figura 1-5, se impulsará un mercado global del hidrógeno verde para ser usado en distintas áreas.

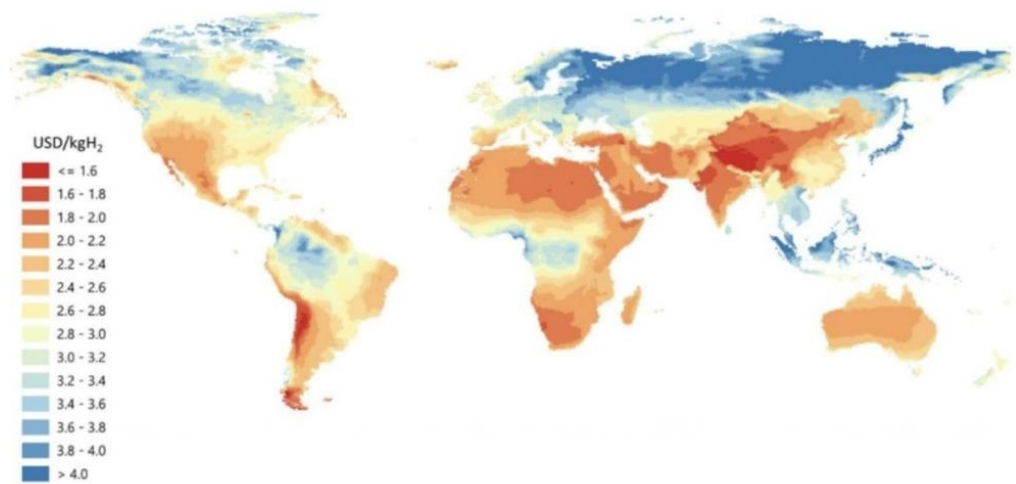


Fuente: Ministerio de Energía.

Figura 1-5. Proyección de la demanda global de energía suministrada con hidrógeno.

1.3.1 Potencial energético

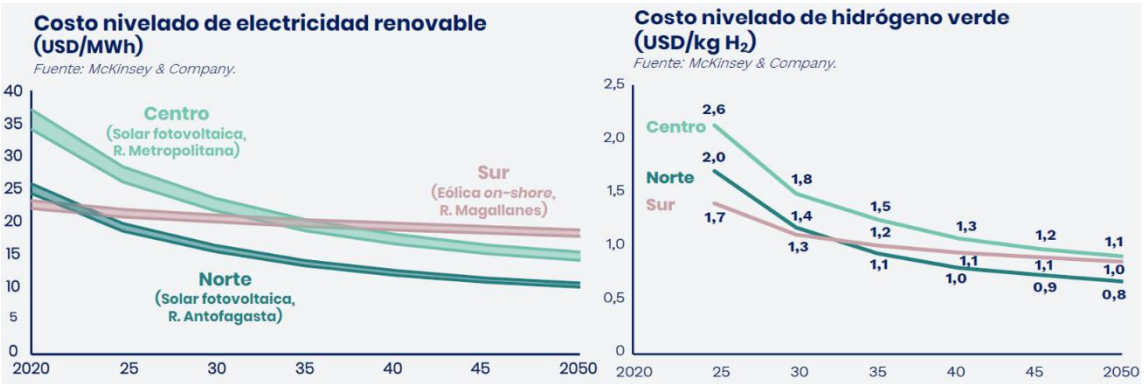
Chile cuenta con condiciones reconocidas internacionalmente para la generación de energías renovables debido a su geografía y clima, entregando los costos bajos internacionalmente como muestra la Figura 1-6, algunos factores que contribuyen a ello son la radiación solar, los viento y los recursos hídricos [5]. El primero, destaca en la zona norte del país por sus cielos despejados que posee la más alta radiación solar en el mundo, capaz de producir 1.180 [GW] de energía fotovoltaica y 506 [GW] de energía termo solar, como lo es en el caso de cerro dominador. Por otra parte, el país contiene una de las mayores reservas de energía eólica de Sudamérica, capaces de producir 161 [GW], debido a la presencia de una corriente de vientos llamada “corriente de Humboldt” que sopla desde el sur hacia el norte de Chile.



Fuente: AIE (2019), The future of hydrogen, seizing today’s opportunities.

Figura 1-6. Costos del hidrógeno de los sistemas híbridos solares fotovoltaicos y eólicos a largo plazo.

El potencial energético renovable es de 1.800 [GW], equivalente a 70 veces la demanda del país, esta generación de energía está en constante crecimiento teniendo en cuenta que los sectores solares y eólicos en 6 años han quintuplicado su capacidad, proyectando que para el año 2030 el 70% de las energías sea renovable. Esto provocara un efecto en cadena, dando como resultado que la proyección de los costos para generar esta electricidad renovable, de la mano con la producción de hidrógeno, vayan a una tendencia a la baja al año 2050, disminuyendo el costo actual, como muestran las proyecciones de la Figura 1-7.



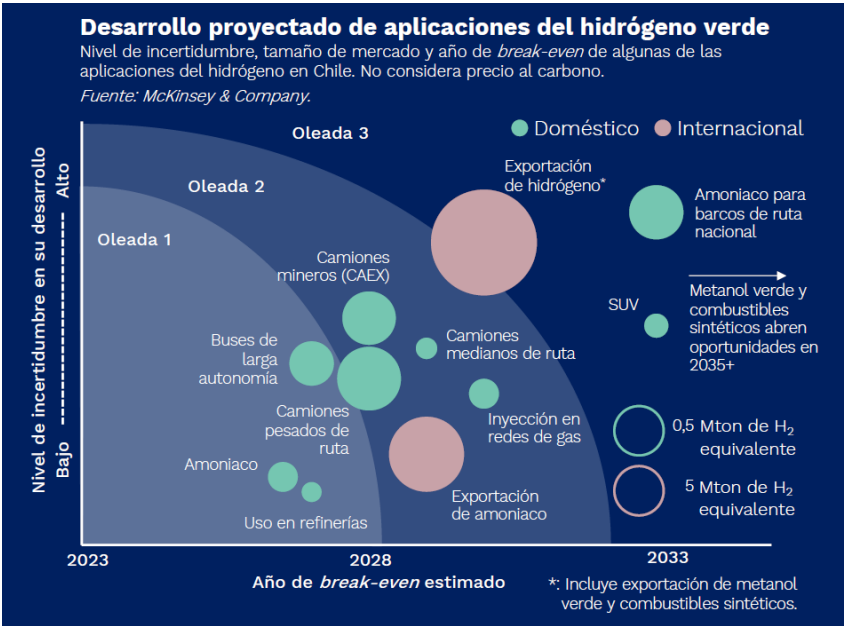
Fuente: Ministerio de Energía.

Figura 1-7. Proyección de costos de electricidad renovable e hidrógeno verde.

Un hito importante en la industria de la energía fue la creación de la ley 21.305, que tiene como objetivo elaborar el primer plan nacional de eficiencia energética, donde por primera vez se considera al hidrógeno como un combustible, otorgándole al Ministerio de Energía la regulación de su uso para distintos fines. Además, la ley contempla beneficios tributarios para vehículos que no produzcan emisiones, entre los que considera los automóviles de hidrógeno.

1.3.2 Proyecciones del desarrollo

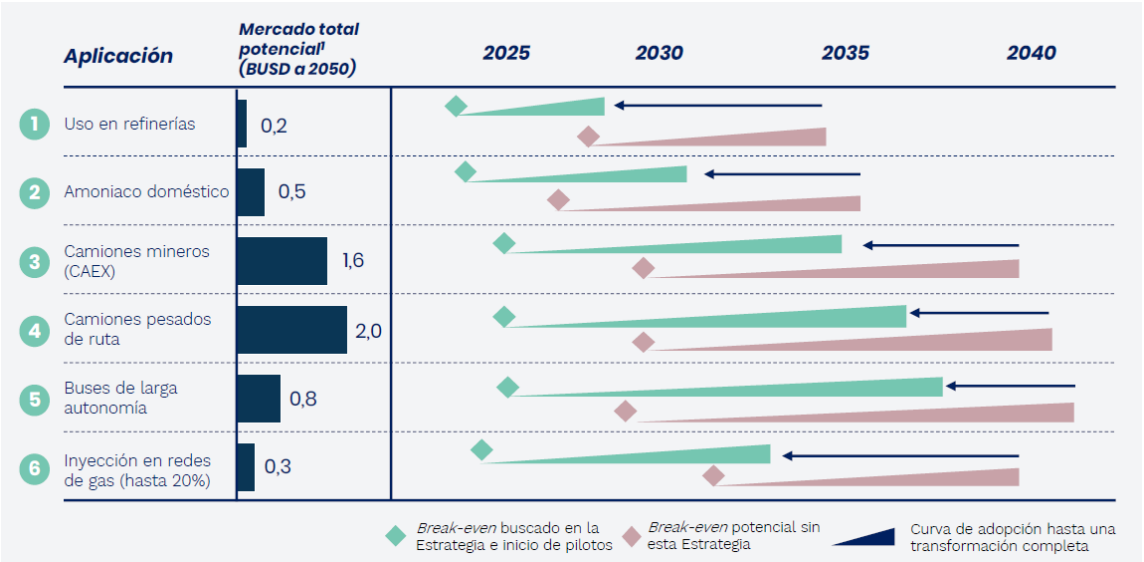
El combustible limpio y toda su cadena productiva, como por ejemplo la electrólisis, es un tema que va ganando popularidad en Chile y ha sido el foco de varias discusiones, tomando en cuenta las iniciativas en marcha para promover y financiar el uso de este combustible. Transformando al hidrógeno verde en un elemento competitivo doméstica e internacionalmente, tal así, que Chile busca sacar provecho del potencial renovable del país, al producir cobre verde, amoníaco verde, exportaciones con bajas huellas de carbono y otras aplicaciones, donde destaca el grupo de camiones de ruta en la aplicación nacional, como se plantea en la Figura 1-8 donde se planificaron en 3 oleadas.



Fuente: Ministerio de Energía.

Figura 1-8. Proyecciones de desarrollo en aplicaciones del hidrógeno verde.

Para que esto suceda, es necesario un compromiso y una coordinación público-privada desde ya para disminuir las barreras y facilitar su desarrollo, esto vendrá de la mano de una aplicación local temprana para “la primera etapa (2020-2025)”, esta estrategia está destinada principalmente a 6 aplicaciones prioritarias para construir el mercado local del hidrógeno, resaltando los camiones pesados de ruta como el mercado potencial más grande, ilustradas en la Figura 1-9. Lo que permitirá generar el conocimiento, infraestructura y cadenas de suministro necesarias para acceder al mercado de la exportación y la aplicación de uso local en Chile, logrando producir y fomentar la demanda de este elemento y sus derivados [6].



Fuente: Ministerio de Energía.

Figura 1-9. Programación de aplicaciones e influencia en el mercado.

Una vez se haya conseguido la aplicación local del hidrógeno, se dará comienzo a la segunda y tercera etapa consecutivamente de la estrategia. Buscando levantar una industria de producción y exportación de energías limpias, desarrollando nuevas tecnologías y aplicaciones para la descarbonización.

El cumplimiento de la estrategia nacional estará dado por acciones planeadas y ejecutadas con precisión, para este fin es que se generó un plan de acción que además de cubrir estos pilares tendrá como finalidad la culminación de la estrategia de hidrógeno verde en Chile.

1.3.3 Plan de acción

En primer lugar, lo que plantea la estrategia es financiar proyectos de hidrógeno verde por un total 50 millones de dólares, que concluirán en una implementación que permita minimizar los costos de producción de hidrógeno en Chile, aproximadamente a menos de 1,5 [USD] por kg de H₂V para fines del 2030. Posteriormente, se establecerán mesas público-privadas con el fin de discutir la ruta de un impuesto reflejado en el costo social del uso de combustibles que emitan GEI.

Como las normativas y la seguridad es un punto fundamental en la producción, manejo y usos del hidrógeno, se establecerá un desarrollo en la regulación y normativa con el fin de entregar seguridad a los inversionistas y desarrolladores; como también para agilizar los proyectos y aplicaciones de este. Para minimizar la incertidumbre de las iniciativas privadas, se destinará un equipo operativo para acompañar el desarrollo del hidrógeno en diversos ámbitos, así se resolverán los posibles problemas de coordinación para introducir de forma segura las nuevas tecnologías. Además, se revisarán las regulaciones y la infraestructura del gas natural para la implementación segura de un mecanismo gradual de hidrógeno en las redes de gas, con la finalidad de entregar este combustible limpio para su uso en la industria doméstica, así reutilizar la infraestructura existente y complementar al gas natural en su rol de energético de transición.

1.4 INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

La inversión en movilidad con nuevas tecnologías que busquen emitir cero emisiones es una tendencia mundial que investigan todos los países para descarbonizar la matriz energética, principalmente en el sector del transporte terrestre, combatiendo una de las importantes fuentes de emisiones que afectan el cambio climático. Bajo este criterio, ya hay países en Europa, Asia y América que trabajan hoy en su política de promoción de vehículos que cumplan con este criterio, sustituyendo los motores en base a combustión como los conocemos hoy en día. Chile no es la excepción al caso, ya que, el gobierno

anunció en su estrategia nacional de electromovilidad que al 2035 el 100% de los vehículos livianos, medianos, de transporte público y maquinaria móvil mayor (minería) que estén a la venta serán cero emisiones. Posterior a este acuerdo, al 2040 los vehículos de maquinaria móvil menor (construcción, agrícola y forestal) y el 2045 el transporte de carga y buses interurbanos [7].

Los vehículos eléctricos pueden ser clasificados dependiendo de su tecnología, por lo que se destacan 3 tipos en el mercado [8].

- BEV - Vehículo eléctrico a batería: No poseen emisiones debido a que no cuentan con un tubo de escape y funcionan con un pack de batería que se recargan desde la red eléctrica a través de cargadores de DC o toma de corriente AC.
- PHEV - Vehículo híbrido enchufable: Son vehículos híbridos que funcionan con baterías y un motor de combustión interna en caso de quedarse sin energía eléctrica. Cuenta con una autonomía de 70-80 [km] en modo eléctrico, utilizando el motor de combustión de combustibles convencionales como apoyo para distancias más largas.
- FCEV - Vehículo con Celda de hidrógeno: Este último cuenta con una presencia baja en el mercado, debido a que aún están en desarrollo sus modelos. No posee emisiones, ya que, no cuenta con escape. Funciona con su estanque de hidrógeno que suministra a la celda de combustible y un pack de baterías que alimentan el motor eléctrico, la autonomía de los vehículos es igual a uno convencional contando con aplicaciones en el transporte de carga y viajes interurbanos.

Chile bajo este panorama de trabajo continuo para buscar la implementación de nuevas tecnologías, inició un estudio para crear una línea base regulatoria y proponer un plan de acción nacional para desarrollar un marco regulatorio para la seguridad del proceso [9].

Respecto a la regulación de los camiones y tractocamiones, el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones en el 2018 publicó el decreto 45, el que estipula los requisitos técnicos que deben cumplir los dispositivos y sistemas de seguridad de estos vehículos. La norma no hace diferencia según el tipo de combustible, por lo que es aplicable sin discriminación a lo que se encuentre dentro de la categoría, aunque hay una respuesta del ministerio de que se está definiendo las normas, procedimientos, requisitos e incentivos para este nuevo mercado de la movilidad a base de hidrógeno.

Según la información disponible del Ministerio de Energía y recopilando el listado de los principales proyectos de hidrógeno a nivel nacional, en el área de innovación tecnológica, destacan dos consorcios propuesto y financiado por la corporación de fomento de la producción (Corfo) [10], los cuales buscan probar el hidrógeno como combustible en el transporte de carga en la minería. Resultando ser un punto de referencia, pues, el funcionamiento de estos vehículos utiliza cantidades de combustible diésel al igual que el transporte de carga terrestre de nuestras rutas nacional.

1.4.1 Motores de combustión dual diésel – Hidrógeno

El primer consorcio liderado por la empresa Alset en conjunto con la Universidad de Santiago de Chile, Universidad Católica, Compañía Minera del Pacífico, BHP Chile, Anglo América sur, entre otras. Está estudiando y trabajando en el proyecto que tiene por objetivo usar los motores existentes de combustión interna para reacondicionarlos en un motor de combustión dual con diésel e hidrógeno. Con el fin de comprobar la viabilidad técnica y económica que requiere la adaptación de equipos CAEX (camiones mineros), reequipándolos para sustituir el diésel, se utiliza el equipamiento de fábrica ya existente, obteniendo un camión híbrido que pueda operar de manera dual con la combinación anteriormente descrita.

Aunque el proyecto prometía ventajas como el bajo costo en la implementación, confiabilidad en el suministro de combustible y un reemplazo del 60% al 97% del diésel (anunció José Ignacio Galindo, CEO de Alset Ingeniería Spa en el Foro Internacional de Hidrógeno Verde). Se presentaron incumplimientos de los plazos e información, acusaciones cruzadas y tramas sin resolver, lo que conllevó a una disputa judicial lo que congeló cualquier avance [11].

Sin embargo, aún hay esperanza para los motores de combustión interna dual por parte de una reconocida empresa japonesa como lo es Toyota. Con el objetivo de mantener a la vanguardia en su tecnología y brindar a sus clientes modelos que reduzcan la huella de carbono, la compañía nipona diseñó el concepto del Corolla Cross H2. Un prototipo de vehículo de carretera, adaptando el motor turbo de 3 cilindros de 1,6 [L] del GR Corolla con tecnología de motor de inyección directa de hidrógeno a alta presión cuya ventaja es que se recarga en apenas 10 minutos [12]. A pesar de que aún va a mitad del desarrollo para comercializar el producto, ha presentado una oportunidad en las carreras deportivas con la inscripción en todas las carreras de resistencia Super Taikyu para evaluar la introducción de mejoras.

1.4.2 Vehículos celda de hidrógeno

El segundo consorcio apoyado por la CORFO y liderado por la Universidad técnica Federico Santa María con colaboraciones del Centro Nacional del Hidrógeno de España, Ballard Power Systems (Canadá), Agencia Chilena de Eficiencia Energética, Codelco, Linde, Engie, entre otros. Buscan generar un prototipo de vehículo de aplicación para minería subterránea que funcione con energía eléctrica proveniente de celdas combustibles a hidrógeno, funcionamiento inverso de la electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM).

A pesar de que recientemente se busca una aplicación en la minería, esta tecnología ya lleva un desarrollo más avanzado en comparación a los motores de combustión de hidrógeno, por lo que va ganando un especial interés para el transporte cuya operación requiere una alta demanda energética como el transporte de carga con camiones y/o viajes de larga distancia, ya que, la utilización de hidrógeno destaca como fuente de energía debido a su alta densidad energética que posee este gas como se detalla en la sección 1.2.

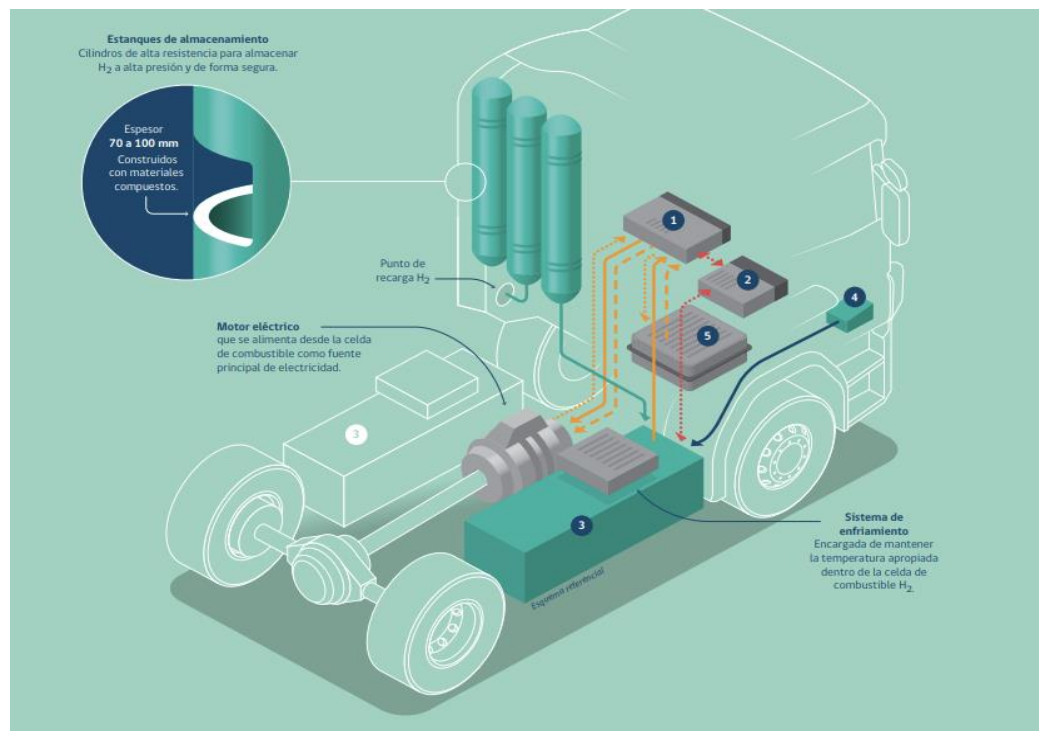
Diego González, experto en movilidad y parte del equipo de Ecopetrol (mayores productores de hidrógeno en Colombia), señaló en la conferencia de portal movilidad marzo 2023 “Movilidad eléctrica y sostenida en Latinoamérica y el Caribe” sobre las flotas pesadas y el uso de hidrógeno lo siguiente:

“(…) Nuestro conocimiento nos indica que en carga pesada y transporte masivo de pasajeros o en flota de vehículos que demande alta autonomía puede funcionar muy bien y ser una opción muy viable.”

Además, en esa misma conferencia, representante de la marca Iveco señaló que en conjunto con la marca Nikola ya están en desarrollo vehículos a hidrógeno, como el modelo Nikola Tre FCEV en la gamma pesada y están en faceta de pruebas para salir al mercado al 2025 una vez que cumpla con todos los estándares europeos [13]. Por otra parte, la marca coreana internacional Hyundai ha puesto en disposición tractocamiones al mercado, con su modelo Xcient y NEPTUNE (aún en desarrollo).

Funcionando con el potencial de una batería para almacenar energía, teniendo la oportunidad de trasladarse y la capacidad de utilizarse cuando sea requerido, con un tiempo de recarga entre 10 a 15 [min] en camiones y una autonomía alrededor de 400 a 750 [km]. Para contextualizar, un camión pesado convencional requiere de 42 [kg] de diésel (50 [litros]) para recorrer 100 [km], en cambio, si el camión fuera FCEV haría falta solamente 11 [kg] de H_2 para recorrer la misma distancia. Para comprender mejor el funcionamiento y la estructura de estos vehículos, se hace referencia en la Figura 1-10 a los 5 componentes esenciales de los camiones FCEV. [14]

1. Conversores/Inversores de corriente eléctrica.
2. Sistema de control.
3. Módulo de celdas de combustibles.
4. Sistema de aire.
5. Batería auxiliar.



Fuente: Ministerio de Energía.

Figura 1-10. Esquema referencial camiones FCEV.

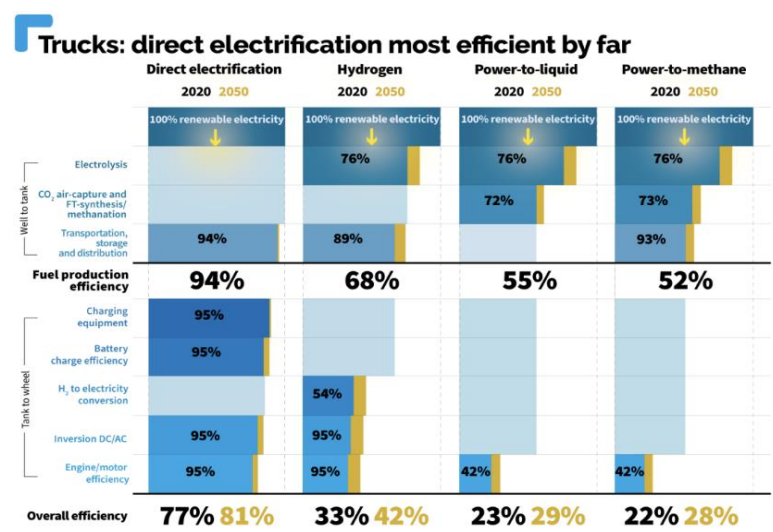
1.5 RENDIMIENTO ENERGÉTICO

El rendimiento energético, se refiere a la capacidad que posee un equipo para realizar un trabajo de manera efectiva a partir de la energía entregada. En el ámbito de los motores, el rendimiento generalmente se va a referir a la cantidad de energía útil que se obtiene de un motor en comparación con la cantidad de energía que se le suministra a partir de una fuente de poder o combustible. Siendo un aspecto importante para tener en consideración con los vehículos, ya que va a afectar directamente el rendimiento y el consumo de combustible, debido a que un motor ineficiente va a perder energía en forma de calor, fricción y emisiones, aumentando el consumo de combustible y aportando una menor salida de energía mecánica.

Para comprender cómo puede verse afectado el rendimiento de estos, hay que entender que existen varios factores involucrados, como el diseño del motor, la capacidad, calidad de los materiales, tecnología de combustión o conversión de energía, condiciones de operación, entre otros. Por lo que se toma en cuenta un estudio que describe escenarios

que enfatizan en el funcionamiento de la tecnología hasta la eficiencia de obtención del combustible.

Utilizando los índices de los vehículos pesados de largo recorrido de la Figura 1-11, podemos obtener los valores medios para cada tecnología. Para esto fue evaluado la producción del combustible, considerando los distintos panoramas como la electrólisis del proceso, la captura de emisiones, y por último el transporte, almacenamiento y distribución que conlleva. Además, se cuantificó la eficiencia de cada tecnología del motor, teniendo en cuenta la eficiencia del equipo de carga y batería (BEV), la conversión del H2 (FCEV), inversión de corriente y la eficiencia energética del motor y en el último panorama se presenta la utilización de hidrocarburos sintéticos, ya sea en forma comprimida o licuada [15].



Fuente: Transportenvironment.

Figura 1-11. Eficiencia de tecnología en camiones.

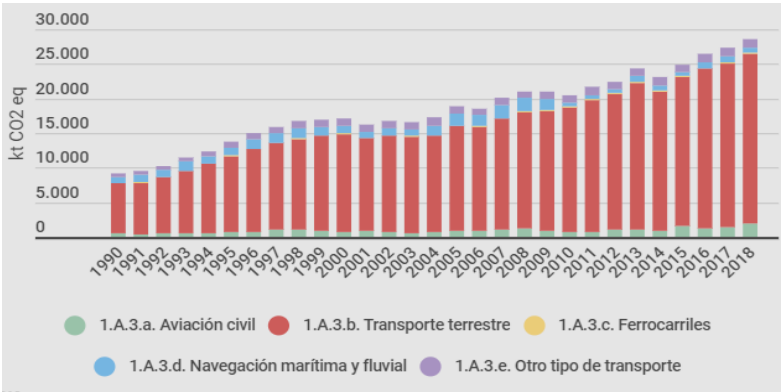
Se asume que los vehículos diésel y los de combustión dual poseen una eficiencia de motor similar en este contexto. Además, se excluyen las pérdidas mecánicas y factores externos de los cálculos, lo que implica que se considera solamente la eficiencia del proceso de conversión.

Los avances tecnológicos y las mejoras en la eficiencia de los vehículos pesados son áreas de investigación y continuo desarrollo en la búsqueda de soluciones más sostenibles para el transporte de larga distancia, por lo que se espera un progreso estimado al 2050 representado de color amarillo en la Figura 1-11.

1.6 EMISIONES DEL TRANSPORTE.

Las emisiones de gases de infecto invernadero en los distintos tipos de transporte en Chile, ha sido una fuente significativa equivalente a un tercio de las emisiones GEI. Según información del Ministerio de Medio Ambiente, de acuerdo con la Figura 1-12, se ha incrementado en un 215% desde 1990 y en un 8% desde el 2016 al 2018, explicándose

por el crecimiento del parque automotriz, mayor poder adquisitivo y mejoramiento en la infraestructura vial del país. Se contabiliza un total de 28.615 [kt CO_{2eq}] correspondiente al producto de la quema de combustibles fósiles en las distintas actividades del transporte nacional; como lo son el aéreo, terrestre, navegación, etc. Excluyendo el movimiento internacional y militar [16].



Fuente: Equipo Técnico de Energía del Ministerio de Energía.

Figura 1-12. Emisiones de GEI trasporte por componente, serie 1990-2018

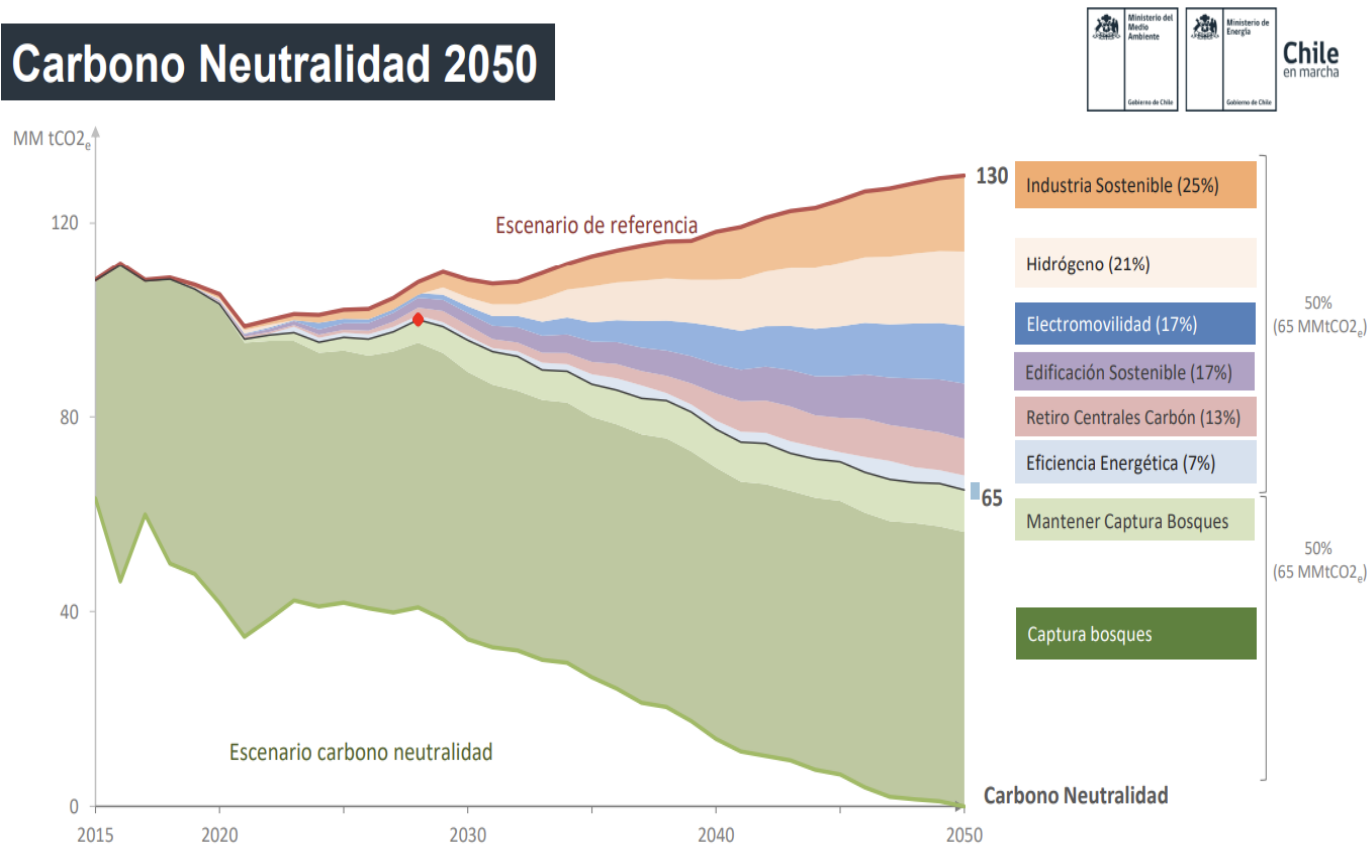
A pesar de tomar en cuenta las distintas categorías del transporte, hay uno que domina con un 85,97% de las emisiones. El transporte terrestre utiliza combustibles fósiles como el diésel y gasolina de distintos octanajes, contribuyendo con gases contaminantes que favorecen al cambio climático, contaminación del aire y la reducción de la calidad vida. La ley N°19.300 en su artículo 32, establece los valores permisibles de algunas sustancias o elementos contaminantes que puedan generar algún riesgo para salud de las personas, tal es el caso, que Chile lidera la lista de mayor tasa de mortalidad a causa de la contaminación del aire en Latinoamérica, registrando 230 muertes y una polución cinco veces mayor a la recomendada por la OMS (Organización mundial de la salud).

1.7 METAS CARBONO NEUTRAL.

El compromiso internacional para combatir el cambio climático ha llevado a trabajar en conjunto a 196 países para evitar el aumento de la temperatura del planeta, tal fue el caso que, por primera vez en París en la Cumbre Anual que realiza la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la COP 21 realizó el acuerdo que compromete a los distintos países involucrados en alcanzar al año 2050 el objetivo de carbono neutralidad, para frenar el alza de las temperaturas globales y que no superen el aumento de los 2[°C].

El país, cumpliendo su compromiso internacional ha dispuesto la ley 21.455, que tiene como objetivo hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050, dándole enfoque en distintos aspectos financieros, legislativos, investigativos y de participación ciudadana.

El gobierno ha estado trabajando para establecer la meta al año del 2050, colaborando el Ministerio de Energía y con el Ministerio de Medio Ambiente para identificar los distintos actores en los cuales trabajar para combatir esta crisis. Por lo que, se estimó la reducción de 65 millones de toneladas de CO₂ equivalente para cumplir con la meta de equivalencia de absorción de GEI, siendo el hidrógeno verde el responsable de aportar con el 21% de la descarbonización, como se muestra en la Figura 1-13.



Fuente: NDC y plan de carbono neutralidad 2050.

Figura 1-13. Metas de carbono neutralidad 2050.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2 DIRECTRICES DEL IPCC PARA LOS INVENTARIOS NACIONALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

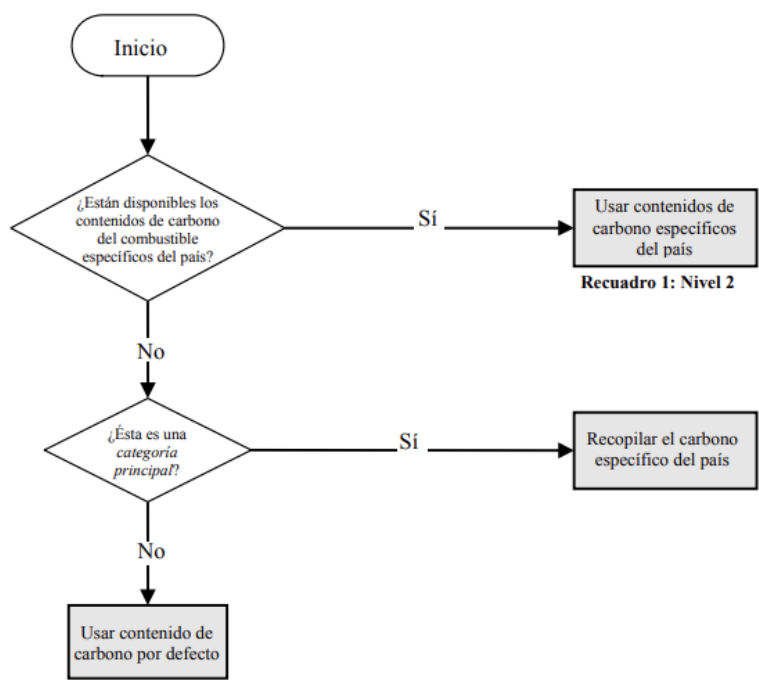
Para dimensionar como impacta la implementación de las tecnologías, se cuantifican las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Es por esto, que el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC), desarrolla directrices para la elaboración de inventarios nacionales de GEI. Calculando los consumos actuales del parque vehicular de camiones de carga, la demanda energética en el tiempo, las emisiones que produce el parque vehicular y se estimaran la reducción en los escenarios propuestos aplicando las tecnologías estudiadas. Por último, se tomarán estos valores para identificar la demanda de la aplicación del hidrógeno verde y el aporte en la reducción de emisiones como sustituto del diésel, en las metas de carbono neutralidad al año 2050.

2.1 ESTIMACIÓN DE EMISIONES

La metodología para determinar los gases de efecto invernadero originario de vehículo de carga de transporte terrestre, se representa en la publicación de las directrices del IPCC de 1996 y la GPG2000, que son recopiladas y actualizadas en el capítulo 3 para combustión móviles en las “Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero”, donde responde a la necesidad de garantizar la coherencia de los contenidos que no fueron abordado con anterioridad. Las emisiones resultantes de la combustión de combustibles fósiles conllevan a la producción de monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (N_xO), hidrocarburos (HC), material particulado fino (MP_{2.5}), carbono negro (BC), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄).

2.1.1 Estimaciones de CO₂

Los GEI relacionado con el transporte carretero de carga abarcan todos los vehículos con motor de combustión interna que se movilizan por los caminos de nuestro país, es por esto por lo que nace la necesidad de distinguir el grupo de estudio. La publicación anteriormente mencionada describe dos formas para estimar emisiones, la primera, es de acuerdo con el combustible vendido ideal para el CO₂, mientras la segunda, depende de la distancia, tipo de vehículo y de carretera, adecuado para el CH₄ y N₂O. Para un correcto uso de información y buena práctica se utiliza un árbol de decisiones representado en Esquema 2-1, el que tiene como objetivo la elección del método según su nivel.



Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero; Capítulo 3: Combustión móvil.

Esquema 2-1. Árbol de decisión para las emisiones de CO2 procedentes de la quema de combustibles en los vehículos terrestres.

Siguiendo el árbol de decisiones figurado en Esquema 2-1, no se encuentra disponible el contenido de carbono del combustible específico del país, pues, la información disponible engloba todas las emisiones de los vehículos terrestre. Además, el grupo de estudio pertenece a una categoría específica, por lo que se opta a el Nivel 1 que utiliza el contenido de carbono por defecto del combustible.

El método del nivel 1, calcula las emisiones de CO₂ a partir del combustible estimado que se utiliza anualmente (combustible vendido) por su factor de emisiones del combustible. Para lograr estas estimaciones, es necesario tener los siguientes datos de entrada para formar un escenario de referencia.

- Total de camiones inscritos.
- Promedio de kilómetros recorridos anualmente.
- Rendimiento por litro de combustibles.

Con las variables anteriormente mencionada es posible estimar la demanda de combustible de consumo de diésel anual según la Ecuación 2-1 y así aplicar el resultado en la Ecuación 2-2 y Ecuación 2-3 para determinar las emisiones de GEI del transporte.

$$C_e = \sum_{i,j} (V_{i,j} * D_{i,j} * C_{i,j})$$

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero; Capítulo 3: Combustión móvil.

Ecuación 2-1. Demanda de combustible.

Donde:

- C_e = Combustible estimado, Uso total del combustible estimado a partir de los datos de distancias recorridas (KRV) [l].
- $V_{i,j}$ = Cantidad de vehículos del tipo i que utilizan combustible j.
- $D_{i,j}$ = kilómetros anuales recorridos por vehículo de tipo i, que usan combustible j [km].
- $C_{i,j}$ = consumo promedio de combustible [l/km] por vehículos de tipo i, que utilizan combustible j.
- i = tipo de vehículo (p. ej., automóvil, autobús, camiones)
- j = tipo de combustible (p. ej., gasolina para motores, diésel, gas natural, GLP)

Una vez definido el escenario referencial del consumo anual del diésel, es posible estimar las emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo en cuenta que el método exige que el combustible vendido se exprese en Tera julios, por lo que se usa el factor de conversión de 3.62×10^{-5} [TJ/L] para el diésel, valorando las emisiones de CO₂ en la Ecuación 2-2.

$$E_{CO_2} = \sum_a (C_a * EF_a)$$

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero;
Capítulo 3: Combustión móvil.

Ecuación 2-2. Emisiones de CO₂ equivalente.

Donde:

- E_{CO_2} = Emisiones de CO₂ [kg]
- C_a = Combustible vendido [TJ]
- EF_a = factor de emisión [kg/TJ].
- a = tipo de combustible (p. ej., gasolina, diésel, gas natural, GLP, etc.)

Hay que considerar que el factor de emisiones de CO₂ en el nivel 1 toma en cuenta todo el carbono presente en el combustible, lo que incluye las emisiones en forma de CO₂, CH₄, CO, COVDM y material particulado.

El factor de emisión de CO₂ o EF_a en el nivel 1, comprende que el contenido de carbono del combustible supone el 100 por ciento de oxidación durante la combustión o inmediatamente después de esta. Considerando los siguientes valores representados en la Tabla 2-1, para los distintos tipos de combustible.

Tabla 2-1. Factor de emisiones CO₂

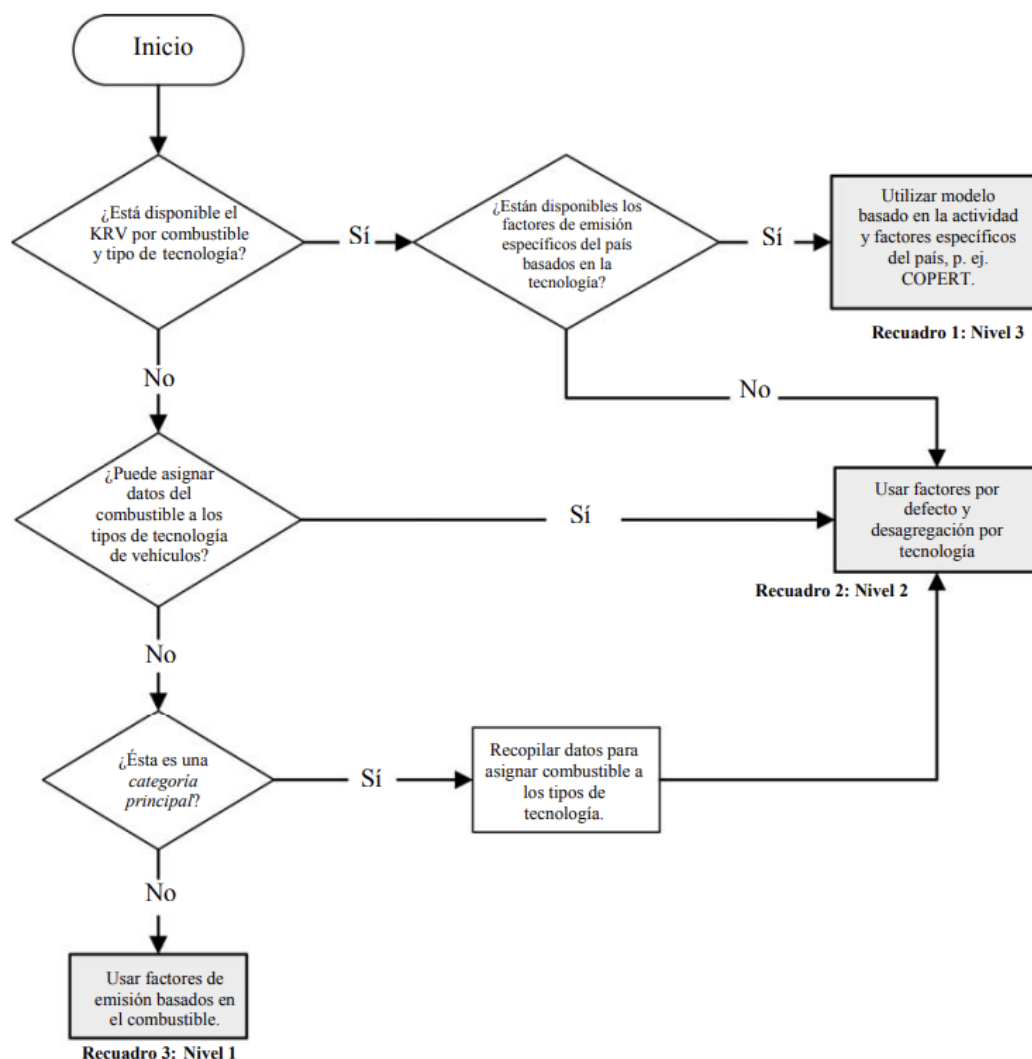
FACTORES DE EMISIÓN DE CO ₂ POR DFEECTO DEL TRANSPORTE TERRESTRE Y RANGOS DE INCERTIDUMBRE ^a			
Tipo de combustible	Por defecto (kg/TJ)	Inferior	Superior
Gasolina para motores	69 300	67 500	73 000
Gas/Diesel Oil	74 100	72 600	74 800
Gases licuados de petróleo	63 100	61 600	65 600
Queroseno	71 900	70 800	73 700
Lubricantes ^b	73 300	71 900	75 200
Gas natural comprimido	56 100	54 300	58 300
Gas natural licuado	56 100	54 300	58 300

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero;
Capítulo 3: Combustión móvil.

Siguiendo el procedimiento de las directrices del IPCC, continúa estimar las emisiones de N₂O y CH₄, sin embargo, este último será considerado solamente para discernir información dentro de las estimaciones del CO₂.

2.1.2 Estimaciones N₂O y CH₄

La estimación con exactitud de N₂O y CH₄ son más compleja que la anterior, debido a que esta depende de la tecnología del vehículo, el combustible y las condiciones. Además, se ve afectado por la distribución de los controles de emisión de la flota, que considera la actividad basada en la distancia y el consumo de combustible desagregado. Para comprender el procedimiento se toma en cuenta el árbol de decisión de la Esquema 2-2, el que indica el método según el nivel, sobre la base de existencia y la calidad de los datos.



Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero; Capítulo 3: Combustión móvil.

Esquema 2-2. Árbol de decisión para las emisiones de CH₄ y N₂O de los vehículos terrestres.

De acuerdo con el árbol de decisiones del Esquema 2-2 para estimar los GEI, no se encuentra disponible el KRV con su tecnología específica de manera oficial y tampoco es posible asignarle el recorrido anual que ha realizado según las características del vehículo con fuentes oficiales. Es por esto, que se van a utilizar los factores de emisión basados en el combustible, es decir, el nivel 1 que estipula la Ecuación 2-3.

$$E = \sum_a (C_a * EF_a)$$

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero; Capítulo 3: Combustión móvil.

Ecuación 2-3. Emisiones de N₂O y CH₄.

Donde:

- E: Emisiones en kilogramos.
- EF_a, Factor de emisión [Kg/TJ].
- C_a: Combustible consumido [TJ] para una actividad móvil.
- a: Tipo de combustible a.

El factor de emisiones de N₂O y CH₄, depende principalmente de la combustión y rendimiento particular de cada vehículo, por lo que, debe utilizarse un factor específico dado en la Tabla 2-2, que recopila datos según el tipo de combustible y la categoría representativa de los vehículos.

Tabla 2-2. Factor de emisiones N₂O y CH₄

CUADRO 3.2.2 FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO DE N₂O Y CH₄ DEL TRANSPORTE TERRESTRE Y RANGOS DE INCERTIDUMBRE ^(a)						
Tipo de combustible / Categoría representativa de vehículo	CH ₄ (kg/TJ)			N ₂ O (kg/TJ)		
	Por defecto	Inferior	Superior	Por defecto	Inferior	Superior
Gasolina para motores – sin controlar ^(b)	33	9,6	110	3,2	0,96	11
Gasolina para motores – catalizador de oxidación ^(c)	25	7,5	86	8,0	2,6	24
Gasolina para motores – vehículo para servicio ligero con poco kilometraje, modelo 1995 o más nuevo ^(d)	3,8	1,1	13	5,7	1,9	17
Gas / Diesel Oil ^(e)	3,9	1,6	9,5	3,9	1,3	12
Gas natural ^(f)	92	50	1 540	3	1	77
Gas licuado de petróleo ^(g)	62	na	na	0.2	na	na
Etanol, camiones Estados Unidos ^(h)	260	77	880	41	13	123
Etanol, automóviles, Brasil ⁽ⁱ⁾	18	13	84	na	na	na

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero;
 Capítulo 3: Combustión móvil.

Considerando lo anterior, cabe recalcar que el combustible utilizado es el petróleo diésel en camiones, explicando en los incisos de esta categoría que se pueden observar el Anexo 1 que se utilizó representativamente un camión diésel europeo con un rendimiento de unos 5 [km/l].

2.2 DEMANDA ENERGÉTICA

Con el consumo de combustible [Tj], es posible esclarecer la demanda energética y así determinar la necesidad de hidrógeno asumiendo las siguientes consideraciones.

- En el caso de la implementación en la tecnología dual, basada en reacondicionar los motores ya existentes de combustión interna, se estima que el rendimiento resulta ser la misma que la del motor tradicional, más menos un 42% (apartado 1.5). Consecuentemente, la demanda energética [Tj] del H₂ será la misma que la que utiliza los vehículos para el efecto de cálculos.

- En el segundo caso, se evalúa el escenario referencial de utilizar la celda de combustible de hidrógeno, la que tendría el propósito de funcionar como un generador eléctrico para el vehículo. Esta cuenta con un rendimiento de alrededor de un 49% en su tecnología, por lo tanto, en proporción sería necesario una menor demanda energética y por ende una menor cantidad de hidrógeno (en comparación a la tecnología anterior).

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible determinar la cantidad de hidrógeno requerido según la Ecuación 2-4, sabiendo la densidad energética del hidrógeno de la Figura 1-3.

$$H2V = \frac{D_e * \Delta \eta}{PCI_H * 10^{-6}}$$

Fuente: Elaboración propia según los poderes caloríficos de los combustibles.

Ecuación 2-4. Hidrógeno requerido.

Donde:

- H2V = Hidrógeno verde requerido [kg].
- D_e = Demanda energética [Tj].
- η = Rendimiento [%].
- PCI_H = Poder calorífico inferior del hidrógeno [mj/kg].

2.3 **PROYECCIONES DE DEMANDA**

Para determinar algún comportamiento, se basa en experiencia en países de la Unión Europea, donde se determina un objetivo preliminar de la demanda de los servicios de movilidad al 2050, teniendo en cuenta los procesos que han pasado estos países, han sido similares en cuanto a su economía que se estima para Chile en los próximos 30 años.

El crecimiento de los vehículos eléctricos en los últimos años ha sido marcado por una conducta de tecnología disruptivas, obteniendo un comportamiento de demanda en curva en forma de S, donde desde el comienzo de esta se puede tratar como un crecimiento exponencial (Kang 1996). Actualmente, nos situamos en la fase de crecimiento, caracterizada por el desarrollo de prototipos, aplicaciones comerciales iniciales y un reemplazo por las nuevas innovaciones de esta tecnología. Posteriormente, se avanza a una fase de madurez, donde comienza una demanda y reducción de costos. Por último, se llega a una fase de obsolescencia, caracterizada por lo pocos avances tecnológicos y sustitución por nuevas tecnologías provenientes de otra industria.

Acorde a la propuesta preliminar del estado en la Nationally Determined Contribution (NDC) para la componente de mitigación, se espera que el 85% de los vehículos de carga superiores a cinco toneladas se impulsarán con celdas de combustibles

en base a hidrógeno, como lo indica el Anexo 2, que ha sido parte del proceso del Ministerio de Energía de identificación de medidas para otorgar un indicador de costo-eficiencia, donde se consideraron unas series de medidas y sus escenarios para lograr la carbono neutralidad al 2050. Por otra parte, va a depender de igual manera de los avances tecnológicos, desarrollo de capital humano e inversión relacionada a la cadena de valor del hidrógeno verde.

Considerando lo anteriormente mencionado, se utiliza una consultoría para la cuantificación de emisiones del plan nacional de la infraestructura para la movilidad, financiado por el Banco Interamericano de desarrollo, considerando dos escenarios de implementación del hidrógeno en los vehículos de estudios:

- Optimista: Se considera un 50 % de los camiones a hidrógeno al 2050.
- Pesimista: Se considera un 10% de los camiones a hidrógeno al 2050.

Cabe recalcar que las emisiones relacionadas a esta tecnología de generación eléctricas son nulas, asumiendo el uso de hidrógeno verde.

2.4 ESTIMACIONES DE EMISIONES GEI

La finalidad del estudio va dirigida a informar y visualizar el impacto de los cambios que se producirán al utilizar hidrógeno verde como combustible para la reducción de gases de efecto invernadero y lograr los objetivos del país al carbono neutralidad al 2050. Por esto, es necesario determinar cuántas emisiones llegan a producir hoy en día los camiones y así estimar los cambios producidos a través del tiempo al implantar esta nueva tecnología disruptiva.

Como se especifica en la sección 2.1, se requiere información previa de entrada para lograr estimaciones de los GEI.

En primer lugar, se consideran el total de camiones inscritos dentro del territorio nacional, para esto se toma en cuenta los registros del instituto nacional de estadística (INE), el que alberga los datos de los permisos de circulación actualizada por última vez el año 2021. Sin embargo, se considera los valores del 2018 para contrastar los datos de la sección 1.6. La base de datos considera dos categorías relacionadas al transporte de carga terrestre, haciendo la diferencia entre los tractos camiones y camiones, con un total de 49.838 y 156.222 registros de permisos de circulación respectivamente.

En segundo lugar, queda definir el rendimiento energético del combustible, variando la cifra según modelo y la potencia del vehículo, sin embargo, para efectos de cálculo se toma el valor entregado por la organización latinoamericana de energía, en su balance de energía útil [17]. Convirtiéndose en una guía de referencia para la elaboración de balances en términos de energía útil, recopilando información de empresas de

transporte de carga y expertos en el rubro, considera en promedio un rendimiento energético de los tractos camiones en 10 [km/gal] (2,6 [km/l]) y camiones 17 [km/gal] (4,5 [km/l]).

Por último, es necesario determinar la cantidad de kilometraje que recorre un vehículo anualmente, por lo que se consideró el informe anteriormente mencionado de la OLADE, que nos entrega los kilómetros recorridos por camiones de dos ejes con un total de 61.400 [km] al año, no haciendo referencia a los tractos camiones. Para la segunda categoría, se recopiló información de los modelos de costos de transporte de carga [18], que evalúa los semirremolques de empresas de distintos tamaños por lo largo del todo el país, obteniendo una media recorrida al mes de 9.915 [km], es decir, 118.980 [km] anuales en promedio.

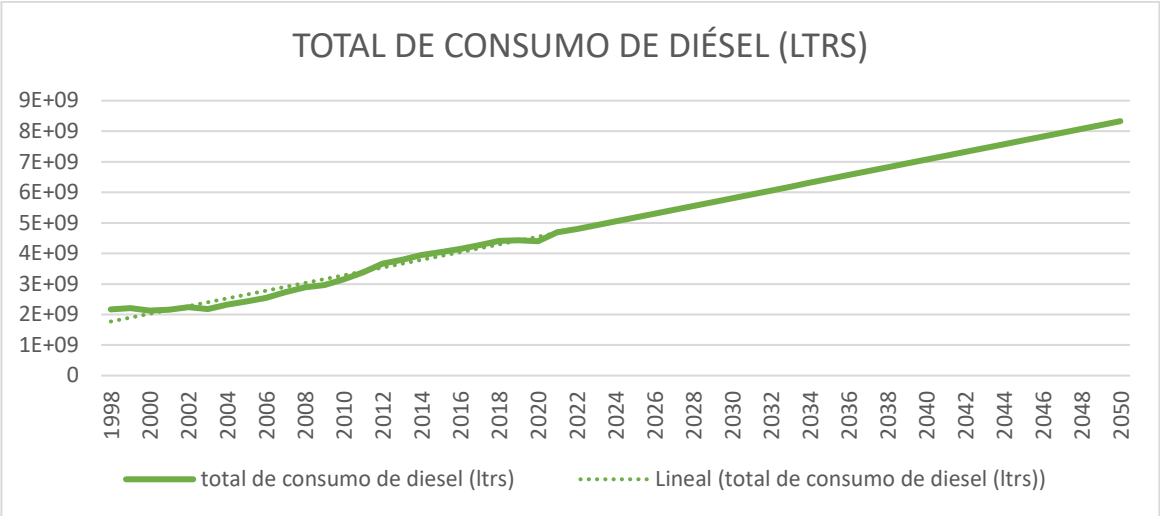
Definiendo los parámetros de entrada anteriormente descritos, es posible tener un panorama estimado del combustible consumido alrededor de cada uno de los años (KRV), trabajando en dos categorías según el tipo de vehículo que se asumen con los registros del INE. En cuanto al tipo de combustible, se va a considerar de manera tajante el uso de diésel, ya que la información resalta este tipo de combustible en específico para este parque vehicular, asimismo, las fuentes lo señalan en la utilización de la flota en sus reportes. Aclarado lo anterior, se procede a utilizar la Ecuación 2-1 para estimar demanda de combustible en litros anuales y así, el consumo energético, obteniendo los siguientes valores representados en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Consumo anual diésel 2018.

Registro Anual	Tractocamión	Camión rígido	Total
Combustible consumido. [l]	2.280.663.554	2.131.562.400	4.412.225.954
Consumo de energía. [tJ]	81.784,60	76.437,83	158.222,42

Fuente: Elaboración propia en base Ecuación 2-1.

Teniendo en cuenta el número de vehículos de transporte de carga que registra el INE, se recopila los permisos de circulación del período de 1998 hasta el año 2021. Así, es posible generar una proyección lineal del consumo del diésel, pudiendo estudiar su comportamiento y estimar la posible demanda reflejada en la Figura 2-1. Llegando a necesitar 8.329,35 [Mega litros] de diésel para suministrar el parque automotriz al año 2050.



Fuente: Elaboración propia según proyecciones Tabla 2-3.

Figura 2-1. Consumo diésel.

Para cuantificar las variaciones de GEI, se examina la sección 2.1.1, donde se utiliza el Factor de Emisiones (FE), que se entiende como el valor de los gases de efecto invernaderos producido al utilizar un combustible. Para el FE del CO₂ se utiliza la Tabla 2-1, que entrega el valor por defecto el diésel oil equivalente a 74.100 [Kg/TJ], calculando la masa de emisiones con la Ecuación 2-2, teniendo los siguientes resultados en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Emisiones de CO₂ 2018.

Tractocamión [kt]	Camión rígido [kt]	Total [kt]
6.060,24	5.664,04	11.724,28

Fuente: Elaboración propia, según Ecuación 2-2.

Al igual que el procedimiento anterior, requiere la asignación de la FE correspondiente para el compuesto que se va a examinar, detallado en la sección 2.1.2. Para llevar a cabo esta tarea de manera efectiva, nos remitamos a la Tabla 2-2 y extraemos los factores de emisiones correspondiente tanto al N₂O como al CH₄. Además, cabe destacar que los valores referenciales consideran un camión con un rendimiento de 5 [Km/l], por lo que se ajusta la tasa de rendimiento a los parámetros predeterminado y se aplica a la Ecuación 2-3, obteniendo los siguientes resultados en Tabla 2-5

Tabla 2-5. Emisiones de N₂O y CH₄ 2018.

Parámetros	N ₂ O		CH ₄	
	Tractocamión	Camión rígido	Tractocamión	Camión rígido
Rendimiento [km/l]	2.6	4.5	2.6	4.5
FE [kg/TJ]	7,5	4.33	7,5	4,33
Emisiones [kt]	0,61	0,33	0,61	0,33

Fuente: Elaboración propia según Ecuación 2-3.

Una vez obtenido los diferentes GEI según las directrices del IPCC, para medir su impacto de manera imparcial se calcula el CO₂ equivalente, transformándose en una herramienta para comparar y evaluar su impacto de manera equitativa. Para esto, es necesario tomar en cuenta el potencial de calentamiento global (PCG) detallado en la sección 1.1 y aplicarlo a los valores de la Tabla 2-5, obteniendo los siguientes datos en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 . CO₂ Equivalente N₂O y CH₄ 2018.

Gases efecto invernadero	CO ₂ equivalente	
	Tracto Camión	Camión rígido
Metano CH ₄ [kt]	12,88	6,96
Óxido nitroso N ₂ O [kt]	190,15	102,68

Fuente: Elaboración propia según PCG.

Cabe mencionar que el metano obtenido en la Tabla 2-6, corresponde a una parte del CO₂ estimado en la Tabla 2-4. Correspondiendo los tractocamiones a un 0.21% y los camiones a un 0.12% para cada categoría.

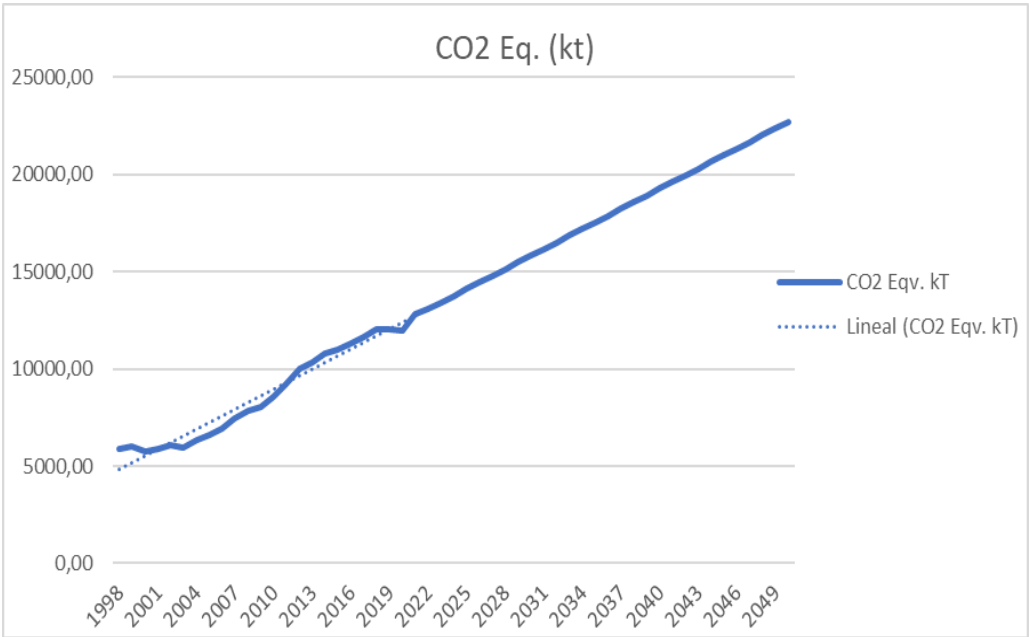
Dados los valores, es posible determinar el aporte total de GEI que entrega el transporte de carga terrestre dentro de país. Donde se distinguirá la contribución con las emisiones del transporte nacional registrada por el Ministerio de Energía en la Figura 1-12 y detallada en la sección Obteniendo los siguientes resultados en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7. CO₂ Equivalente 2018.

Categoría	CO ₂	N20	Total	Emisión del transporte terrestre
Tracto camión [kt]	6060,24	190,15	6250,39	21,84%
Camión simple [kt]	5664,04	102,68	5766,72	20,15%
Total [kt]	11724,28	292,83	12017,11	42,00%

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con los GEI obtenidos.

Así como se obtuvieron los GEI para el año 2018, es posible repetir la metodología para los distintos años donde se tenga los registros del permiso de circulación en el INE. Identificando el aporte de CO_{2eq} del transporte de carga terrestre por cada año, permitiendo divisar la tendencia que siguen los valores, pudiendo proyectar las emisiones al año 2050 en la Figura 2-2 obteniendo 22.707,42 CO_{2eq} [kt]. de emisiones.



Fuente: Elaboración propia según proyección de Tabla 2-7.

Figura 2-2. Proyecciones de CO₂ equivalente

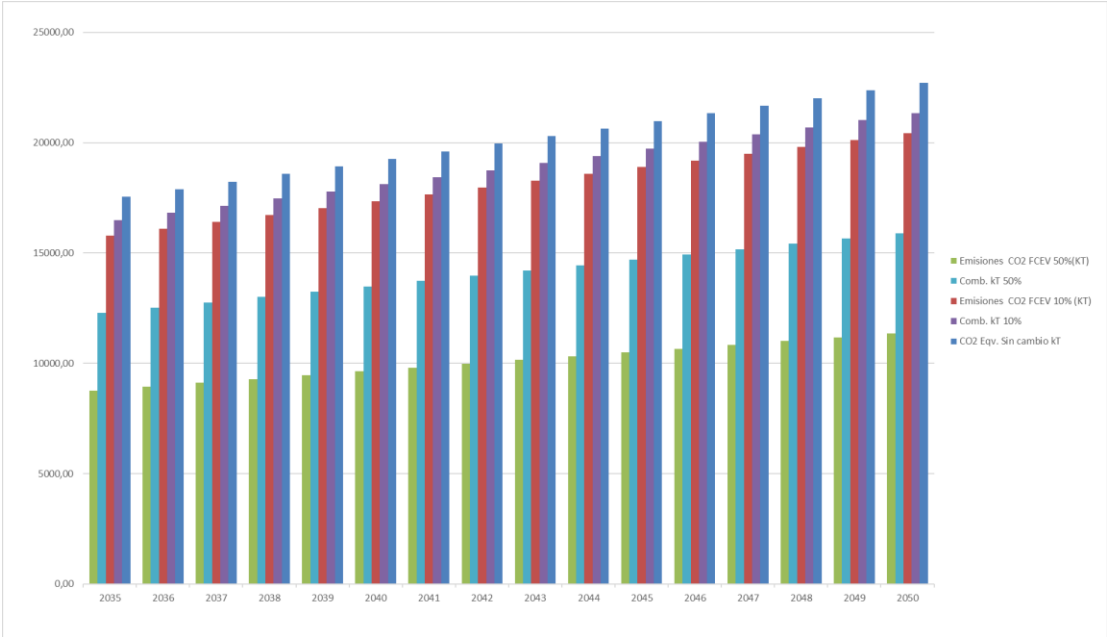
La implementación del hidrógeno verde puede ser una alternativa para la reducción del CO₂ producido por el transporte, por lo que el ingreso de nuevas tecnologías implica un aumento en la demanda del hidrógeno verde reflejándose en el Anexo 3. Conforme a la estrategia nacional que nos indica que la implementación piloto estaría ya a partir del 2035, detallado en la sección 1.3.2 y de acuerdo con las proyecciones de la demanda de la sección 2.3. Se representa a continuación en la Tabla 2-8 necesidad de hidrógeno en períodos de 5 años, en el caso de reemplazar energéticamente todo el diésel y en los panoramas anteriormente descritos.

Tabla 2-8. Demanda de hidrógeno en distinto panoramas.

Escenario	2035	2040	2045	2050
FCEV 50% [kt]	923	1014	1104	1195
FCEV 10% [kt]	185	203	221	239
Combustión dual 10% [kt]	115,42	126,73	138,04	149,35
Combustión dual 50% [kt]	577,1	633,65	690,19	746,73
Reemplazo total [kt]	1924	2112	2301	2489

Fuente: Elaboración propia según Ecuación 2-4.

Dentro de nuestros objetivos se planteó calcular el impacto de la transición del diésel a hidrógeno verde en camiones, para identificar el aporte del país en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y su impacto dentro de la transición energética a la carbono neutralidad al año 2050. Se consideraron distintos escenarios, con diferente tipo de tecnología y se hizo la comparación con el caso de no implementar ningún cambio. Es por esto, que se identificó los distintos casos y se plasmó las emisiones en la Figura 2-3 proyectando los diferentes escenarios.



Fuente: Elaboración propia según la proyección combustible e implementación de tecnología.

Figura 2-3. Proyecciones de emisiones de CO2 en distintos escenarios.

2.5 MITIGACIÓN DE GEI META 2050

Cómo se detalló en la sección 1.7, el país tiene sus metas claras en la reducción de gases contaminantes al año 2050, estimándolas en 65 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Por lo que, se consideran las estimaciones anteriores y se plantean los distintos escenarios para este año identificando el aporte que tendrían las implementaciones del hidrógeno verde en las tecnologías, para la descarbonización total del país, cómo se aprecia en la siguiente Tabla 2-9.

Tabla 2-9. Escenario de mitigación GEI 2050.

Escenario	Mitigación de GEI [millones de toneladas]	Aporte de reducción
FCEV 50%	11,35	17.47%
FCEV 10%	2,27	3.49%
Combustión dual 10%	1,36	2.10%
Combustión dual 50%	6,81	10.48%

Fuente: Elaboración propia según metas carbono país.

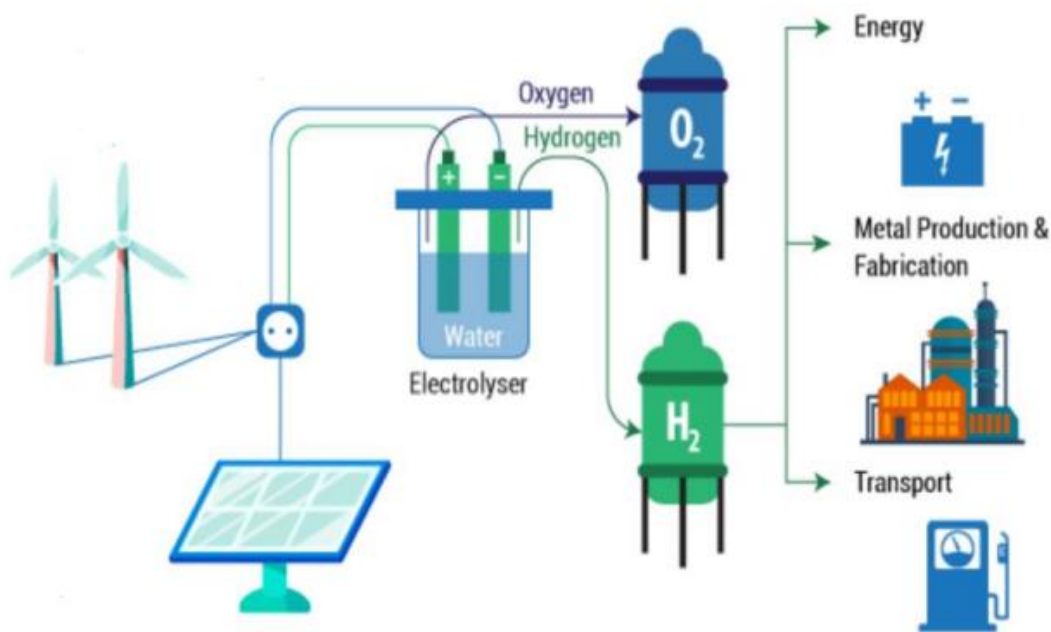
CAPITULO 3: EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA

3 EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA

En el último capítulo, se analizará los requerimientos técnicos que implica la producción estimada en el capítulo anterior, considerando las distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde. Obteniendo el coste nivelado del hidrógeno, para el período evaluado, considerando el valor de la distribución y como este compite ante el diésel. Por último, se evaluará económicamente la implementación de tecnologías vehiculares de hidrógeno, contrastando con un vehículo convencional, para determinar si es competitivo y sustentable ante el mercado.

3.1 CADENA DE VALOR

El hidrógeno verde, con potencial de producir energía limpia por medio de la electrólisis y a través de fuentes de energía renovable, representa un avance para la descarbonización de la economía. Explorando nuevas soluciones que financieramente sean factible, examinando su cadena de valor que se aprecia en Figura 3-1, considerando los insumos requeridos, su producción y almacenamiento, para obtener un costo asociado al hidrogeno.



Fuente: Comité solar e innovación energética CORFO

Figura 3-1. Cadena de valor del hidrógeno verde

Este análisis se realiza en función de la demanda estimada en la sección 2.4, considerando los distintos tipos de tecnología, utilizando la mayor y menor demanda en los distintos períodos.

3.2 **INSUMOS**

Los insumos son parte del proceso de producción, consumiéndose para obtener un elemento de mayor valor, en el caso del hidrógeno verde, se requiere principalmente de agua y energía eléctrica. Se tomará en cuenta los caudales necesarios para cumplir con la demanda establecida en el capítulo anterior. Además, se consideran los requerimientos de energía prevista para el proceso de electrólisis, provenientes de dos alternativas de fuente limpias y renovables como se detalla a continuación.

3.2.1 **Recurso hídrico**

La escasez hídrica ha sido un tema que con el pasar del tiempo ha tomado importancia, la demanda de agua dulce de la superficie y subterránea ha ido en aumento, no obstante, las nuevas tecnologías y el desarrollo del país han permitido obtener el recurso hídrico a través del mar. Los registros de la biblioteca del congreso nacional indica que actualmente existen alrededor de 23 plantas desaladoras, con una capacidad combinada superior a 5600 [l/s] funcionando en Chile, aunque alrededor del 80% de la producción se destina a la minería; se proyecta que la capacidad de este servicio aumente a para fines de la década, debido a 29 proyectos relacionados al tema, de los cuales 21 (72%) de estos correspondería a nuevos proyectos y 8 buscan modificar uno anterior [19].

Para cuantificar el agua requerida en la producción de hidrógeno, hay que tener en cuenta los mencionado en la sección 1.2, que indica que para generar un kilogramo de hidrógeno es necesario 8.9 [litros] de agua desalinizada. A partir de esa cifra, es posible estimar la demanda de agua con la cantidad de hidrógeno (Anexo 3), estimando un consumo anual proyectado en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Proyección de agua requerida para producción de hidrógeno

Tecnología	2035	2040	2045	2050
FCEV 10% [l/s]	52,12	57,22	62,33	67,44
FCEV 50% [l/s]	260,59	286,12	311,65	337,18
Combustión Dual 10% [l/s]	32,57	35,77	38,96	42,15
Combustión Dual 50% [l/s]	162,87	178,83	194,78	210,74

Fuente: Elaboración propia en base a los requerimientos por año

La desalinización de agua se basa principalmente en la tecnología de osmosis inversa, que conlleva a la inversión en equipamiento, costos operacionales, mantenciones, gastos de desarrollo y tramitación del proyecto. La energía eléctrica, es el insumo de mayor costo operacional, alrededor del 44%, con una proyección de disminución de los

gastos, debido a la recuperación de energía, determina el precio del agua a gran escala a [USD] 0,5 el [m³] y los costos de una planta según el tamaño en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Proyección de costos planta desaladora según producción.

Producción de agua. [l/s]	Costo de inversión en equipamiento desaladora [USD]	Costo de producción [USD/m³]
0,12	65.000	1,46
1,16	200.000	0,99
5,79	498.000	0,57
11,57	596.400	0,55
23,15	871.200	0,54
100	9.000.000	0,47
500	45.000.000	0,47
1.000	90.000.000	0,46

Fuente: Elaboración propia en base a la biblioteca del congreso nacional.

Considerando la estimación realizada, para el 2035, 2040, 2045 y 2050 se espera un máximo de 260,59 [l/s], 286,12 [l/s], 311,65 [l/s] y 337,18 [l/s] respectivamente. Los valores nos indican que abarcan en promedio un 5% de la producción de planta desaladora, sin considerar el crecimiento que se espera de estas. Lo que concuerda con estudios técnicos realizados por la Corfo y consultorías, en donde concluyen que el uso y costo de este insumo no posee relación relevante con el costo de la producción del hidrógeno verde.

3.2.2 Energía

Como se detalló en la sección 1.2, es necesario de 50 [kWh] de energía eléctrica para el proceso de electrólisis y así obtener un kilogramo de hidrógeno, es decir, que por cada kilo tonelada de hidrógeno se requieren 50 [GWh]. Por ende, la cantidad de energía para el hidrógeno (Anexo 3), se representa a continuación en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Proyección de requerimiento energético para la electrólisis.

Tecnología	2035	2040	2045	2050
FCEV 10% [GWh]	9.234	10.138	11.043	11.948
FCEV 50% [GWh]	46.169	50.692	55.215	59.738
Combustión Dual 10% [GWh]	5.771	6.336	6.902	7.467
Combustión Dual 50% [GWh]	28.855	31.682	34.509	37.336

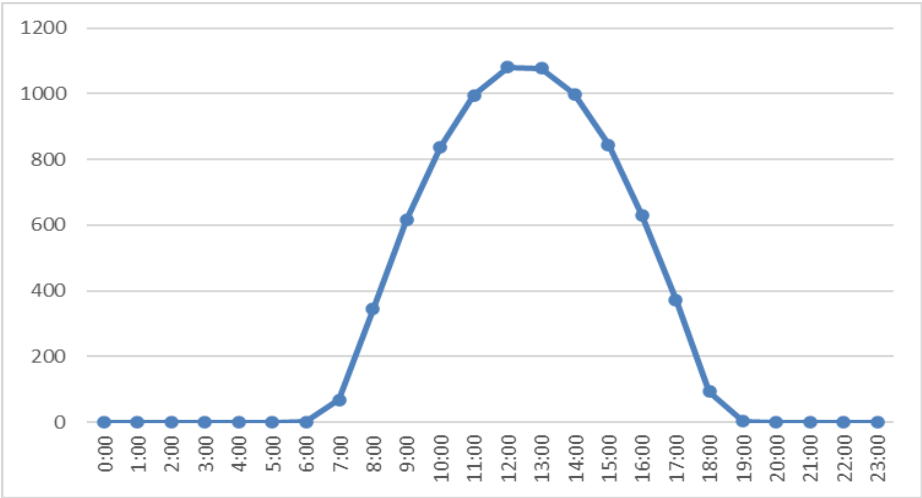
Fuente: Elaboración propia en base a la energía requerida para la electrólisis.

Se estima que el requerimiento de energía vaya disminuyendo a través del tiempo a medida que mejoren la tecnología y la eficiencia del proceso. Además, para evaluar el

costo, es necesario definir la fuente de producción de energía, donde se plantea el siguiente escenario.

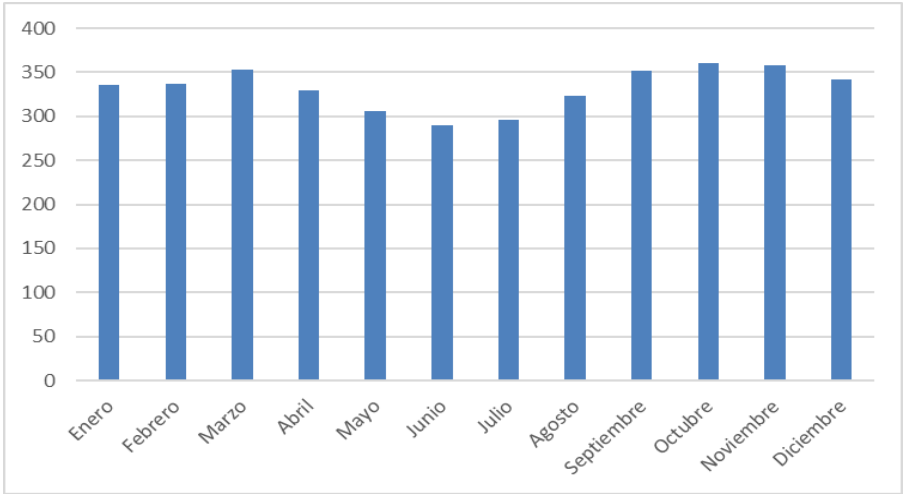
Debido a la alta demanda, se plantea utilizar una planta de energía Off – grid, es decir in situ. Asegurando la obtención de energía de una fuente renovable, manteniendo el sello verde y eliminando los costos de conexión y distribución que implica a la conexión de red eléctrica. Se ha demostrado en estudios de prefactibilidad económica de producción de hidrógeno, un costo de energía entre el 70% y 80% del LCOH en sistemas mixto y on-grid respectivamente. Para esto, se tendrán en cuenta dos tipos de producción de energía limpia y renovable.

La primera, se trataría de una planta fotovoltaica ubicada en la región de Antofagasta evaluado en la latitud -22,5738307 y longitud -68,7143728. Para el análisis se utiliza la plataforma del explorador solar, obteniendo datos de satélites de la irradiación solar con datos correspondientes del 1/1/2004 hasta el 30/12/2016, expresado en la Figura 3-2 y Figura 3-3.



Fuente: Elaboración propia con valores de explorador solar.

Figura 3-2. Irradiación promedio horaria.



Fuente: Elaboración propia con valores de explorador solar.

Figura 3-3 Irradiación promedio mensual.

La radiación proporcionada en la zona evaluada entrega un factor de planta del 24%, según datos del Ministerio de Energía y el comité solar. Aclarando el punto anterior

es posible obtener las potencias nominales, de acuerdo de las distintas demandas según tecnología, en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Potencias nominales de planta fotovoltaica en Calama.

Tecnología	2035	2040	2045	2050
FCEV 10% [GW]	4,4	4,8	5,3	5,7
FCEV 50% [GW]	22	24,1	26,3	28,4
Combustión Dual 10% [GW]	2,7	3,0	3,3	3,6
Combustión Dual 50% [GW]	13,7	15,1	16,4	17,8

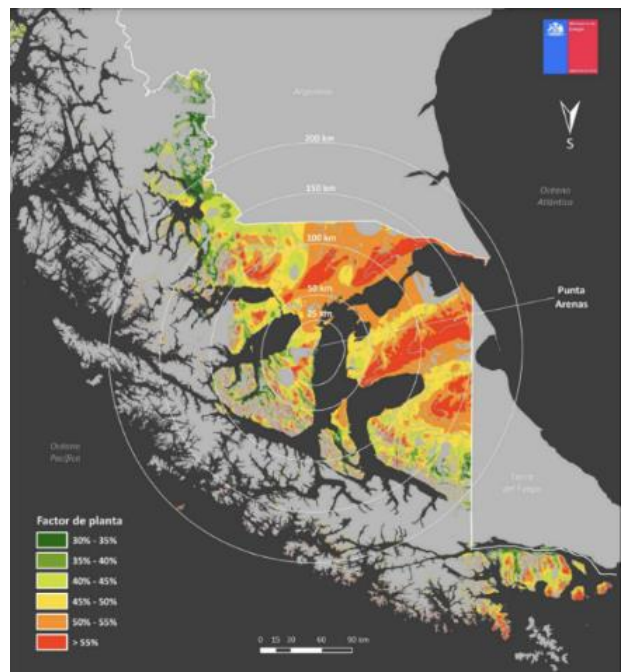
Fuente: Elaboración propia según datos del Ministerio de Energía y el comité solar.

Por otra parte, se estima la energía necesaria de un parque eólico ubicado en la región de Magallanes, a unos 50-100 [km] de la ciudad de Punta Arenas. Por lo que, en la Figura 3-4 se puede apreciar un factor de planta que va del 45% al 55%, considerando un factor de planta promedio del 50%, reflejando los valores de las distintas potencias nominales de la planta en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Potencias nominales de parque eólico en región de Magallanes.

Tecnología	2035	2040	2045	2050
FCEV 10% [GW]	2,1	2,3	2,5	2,7
FCEV 50% [GW]	10,5	11,6	12,6	13,6
Combustión Dual 10% [GW]	1,3	1,4	1,6	1,7
Combustión Dual 50% [GW]	6,6	7,2	7,9	8,5

Fuente: Elaboración propia según datos del Ministerio de Energía.



Fuente: Ministerio de Energía.

Figura 3-4. Factor de planta eólico en región de Magallanes.

3.3 PRODUCCIÓN

En la producción de hidrógeno sin emisiones de CO₂, la electrólisis produce la separación de la molécula de H₂O con energía eléctrica, proveniente de fuentes renovables. La tecnología responsable de este proceso actualmente se presenta en la industria de 3 formas. El electrolizador alcalino, electrolizador PEM y electrolizador SOEC, como se menciona en la sección 1.2.1. Se diferencian por el electrolito en el que se realiza la rotura de la molécula, además de los materiales de su fabricación y de ciertas propiedades que se especifican en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Comparación de electrolizadores alcalinos y PEM

Parámetros	Electrolizador alcalino	Electrolizador PEM
Presión de operación [bar]	2 a 10	15 a 30
Temperatura de operación [°C]	60 a 80	50 a 80
Vida media [horas de funcionamiento]	hasta 100.000	<50.000
CAPEX [\$/KW]	500 a 1.400	1.100 a 1.800
Pureza del hidrógeno [%]	>99,8	>99,9
Eficiencia de conversión LHV [%]	73 a 85	60 a 68
Capacidad de hidrógeno [Nm3/h]	<760	<40
Consumo de energía del sistema [kWh/Nm3]	4,2 a 4,8	4,4 a 5
Consumo de agua purificada [litros/kg de hidrógeno]	8 a 20	8 a 20
Voltaje de celda [V]	1,7 a 2,7	1,7 a 3,1
Densidad de corriente [A/cm2]	0,2 a 0,4	0,2 a 0,6

Fuente: The International Energy Agency. The Future of Hydrogen, June 2019.

Al evaluarse los electrolizadores en la tabla anterior, se descarta la utilización de los electrolizadores de tecnología SOEC, ya que esta se utiliza exclusivamente en laboratorios y producción de hidrógeno para estudio. Además, conlleva consigo un alto costo de implementación, que no cumple con el objetivo de la producción industrial.

Dentro de las cualidades que muestran estos electrolizadores, se puede evidenciar las principales ventajas. En primer lugar, se encuentra la tecnología PEM, que cuenta con un diseño compacto que permite una mayor densidad de corriente, funcionando con alta presión, obteniendo una mayor pureza. A pesar de esto, la tecnología presenta problemas de funcionamiento debido a la alta presión, su menor madurez y desarrollo tecnológico que su contraparte, significando un alto costo en sus componente (por la utilización de materiales preciosos) y una menor vida útil. En cambio, el electrolizador alcalino se seleccionó como el mejor candidato, ya que, posee una alta producción, costos inferiores y

el mayor desarrollo tecnológico en el uso en la industria, con mayor durabilidad de su vida útil. Considerando que posee una baja densidad de corriente y una presión ambiental de funcionamiento, existe una diferencia en la pureza insignificante (0,01%), lo que lo convierte en el mejor candidato en el ecenario propuesto.

En cuanto a la producción de hidrógeno por parte del electrolizador alcalino, en la industria actualmente el mercado ofrece modelos de una producción de 760 [Nm3/h] y un consumo de 4,2 [kWh/Nm³], pero para efectos de cálculos se desarrollan con los parámetros de la Tabla 3-6. Considerando las potencias nominales de cada planta, se determina la cantidad de electrolizadores en los distintos escenarios. Para cubrir la demanda de hidrógeno en el año 2030, y asi calcular la cantidad de combustible producido por hora, expresado en la Tabla 3-7.

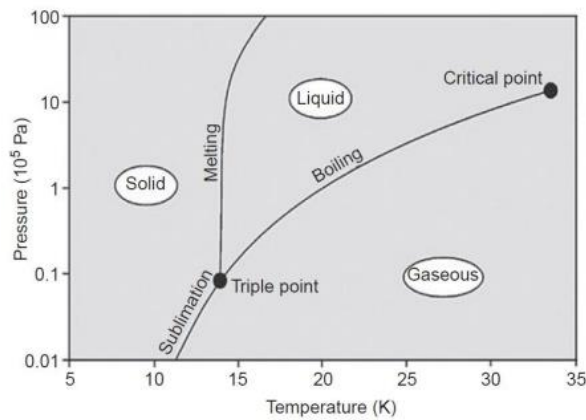
Tabla 3-7. Comparación de cálculos de producción según escenarios

	Escenario optimista		Escenario pesimista	
	Fotovoltaica	Eólica	Fotovoltaica	Eólica
Potencia nominal [kW]	28.400.000	13.600.000	5.700.000	2.700.000
Cantidad de electrolizadores	8.897	4.261	1.785,70	845,9
Producción de hidrógeno [kg/h]	607.760	291.040	121.980	57.780

Fuente: Elaboración propia según parámetros y características del electrolizador

3.4 ALMACENAMIENTO

Hay que tener en cuenta que el hidrógeno es un gas en condiciones ambientales, aunque a presiones altas y temperaturas bajas puede cambiar su estado, como lo muestra Figura 3-5.



Fuente Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies

Figura 3-5. Diagrama de fase del hidrógeno.

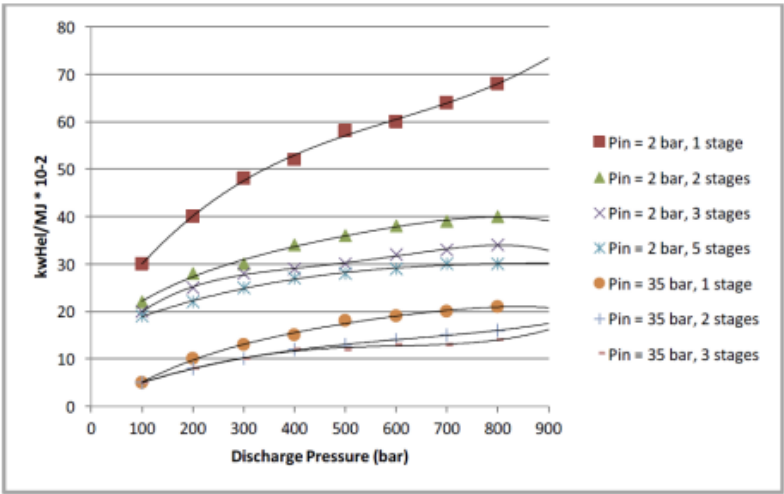
Las opciones de acopio para el hidrógeno son de manera gaseosa o líquida, sin embargo, se excluye esta última, por la razón de las características que se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Detalle de puntos de presión y temperatura relevantes

Diagrama de fase	Temperatura [K]	Presión [kPa]
Punto Critico	33,19	1315
Punto Triple	13,957	7,02
Punto licuefacción-ebullición	20,39	100

Fuente: Elaboración propia según diagrama de fase.

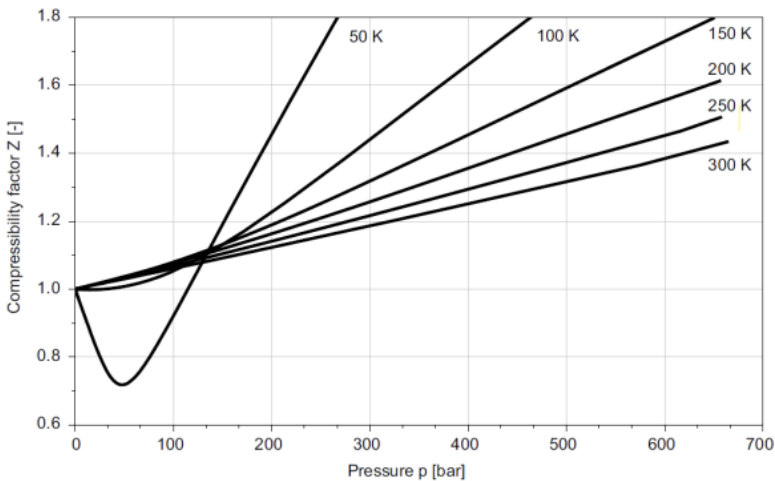
El proceso de almacenamiento y compresión de este gas son tecnologías ya investigadas. Tal así, que se ha definido para un almacenamiento fijo una presión de 700 [bar]. En cambio, para comprimirlo es necesario enfriarlo simultáneamente, disminuyendo el trabajo requerido y aumentando la eficiencia volumétrica del compresor. Por lo que, se evalúa la compresión en distintas etapas como se muestra en la Figura 3-6 [20]. Evidenciando que la potencia necesaria disminuye a medida que se aumenta la cantidad de etapas de compresión y enfriamiento.



Fuente: KTH Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering

Figura 3-6. Compresión del hidrógeno en multietapas a 25°C.

En la literatura la función de la presión y la temperatura para diferentes gases se encuentra como el factor de compresión, generalmente se utiliza la carta generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert. Sin embargo, a las presiones y temperaturas evualuadas el hidrogeno deja de comportarse como un gas ideal, sobrepasando la carta Nelson-Obert, por lo que se utiliza el manual para almacenamiento de hidrógeno que se ve reflejado en la siguiente Figura 3-7. [21]



Fuente: Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage

Figura 3-7. Factor de compresión.

En la Figura 3-7, se puede observar que ha una temperatura ambiente de 25[°C] (300 [K]), donde se obtiene un factor de compresión de 1,5 a una presión de 700 [bar], permitiendo calcular el volumen específico del hidrógeno en un recipiente en la Ecuación 3-1, utilizando la ecuación del gas ideal, habiendo una relación de la masa 1,5 mayor a la real.

$$Pv = ZRT$$

Fuente: Termodinámica, Séptima edición. Y. Cengel, M. Boles

Ecuación 3-1.Ecuación de gas ideal con factor de compresión

Donde:

- P: Presión [kPa]
- v: Volumen específico
- Z: Factor de compresión
- R: Constante de gas para el hidrógeno $4,124 \left[\frac{kPa \cdot m^3}{kg \cdot K} \right]$ [22]
- T: Temperatura [K]

Obteniendo:

$$v = \left[\frac{ZRT}{P} \right] = 0,0265 \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Fuente: Elaboración propia según ecuación 3-1.

Ecuación 3-2. Volumen específico con factor de compresión.

Con el volumen específico de la Ecuación 3-2, es posible determinar el volumen necesario que debe haber disponible en los estanques de almacenamiento. Considerando la demanda de la Tabla 2-8, dimensionando el volumen necesario en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Volumen de hidrógeno para la demanda estimada.

Escenario	2035	2040	2045	2050
FCEV 50% [m³]	24.459.500	26.871.000	29.256.000	31.667.500
FCEV 10% [m³]	4.902.500	5.379.500	5.856.500	6.333.500

Combustión dual 10% [m³]	3.058.630	3.358.345	3.658.060	3.957.775
Combustión dual 50% [m³]	15.293.150	16.791.725	18.290.035	19.788.345

Fuente: Elaboración propia según Ecuación 3-2.

Existen distintos depósitos para mantener este elemento gaseoso, por lo que se toma en consideración las características de la Tabla 3-10, que se van a emplear para un almacenamiento de gran escala de manera estacionaria en la producción, estaciones de distribución de vehículos o tecnología que implique los vehículos.

Tabla 3-10. Clasificación de tipos de estanques.

Tipo de tanque	Presión máxima [bar]	Energía específica [%]	Aplicaciones
Tipo I	300	<2	Aplicaciones estacionarias como laboratorios o uso en industria química.
Tipo II	200	<3	Aplicaciones estacionarias como hidrogeneras.
Tipo III	700	<5	Aplicaciones móviles como vehículos con celdas de combustible
Tipo IV	700	<10	Aplicaciones móviles como vehículos con celdas de combustible.

Fuente: H2 Chile, Asociación Chilena de hidrógeno.

El diseño de estos estanques va a depender de la función a la que estén destinado, para que cumpla con las especificaciones internacionales, debe tenerse en cuenta la ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), que proporciona pautas, requisitos de diseños, construcción, inspección y mantenimiento de estos elementos.

Por último, cabe mencionar, que las instalaciones de hidrógeno es un tema que aún no está claro en el país, tratándolo como una sustancia peligrosa (MINSAL decreto 43). el Ministerio de Energía creo un reglamento de seguridad de instalaciones de hidrógeno que se encuentra en trámite ante la contraloría general, pero excluye surtidores para vehículos terrestre, aéreos y marítimos.

3.5 CÁLCULO DE COSTO DE PRODUCCIÓN (LCOH).

El Ministerio de Energía en conjunto con la GIZ, en sus informes para establecer el coste nivelado del hidrógeno (LCOH por sus siglas en inglés) recurrió a la propuesta de Julien Armijo, miembro de la Internacional Energy Agency (IEA). Quien propone la Ecuación 3-3, que considera los distintos costos de las diferentes etapas de la producción de hidrógeno, desde la capacidad de los electrolizadores, costo de recurso y venta de la producción de oxígeno como un subproducto de la electrólisis.

$$LCOH = P * I * \frac{O + FRC}{f_P * h * Q_{H2}} + Q_{H2O} * C_{H2O} + Q_e * C_e - Q_{O2} * P_{O2}$$

Fuente: Ecuación propuesta por Julien Armijo, Internacional Energy Agency.

Ecuación 3-3. Coste nivelado del hidrógeno (LCOH).

Para definir los parámetros del LCOH, se supone un escenario donde se creará una planta que comience su producción el año 2030, con una vida útil de 20 años. Por lo que se determina que cumpla con la mayor demanda proyectada en los escenarios pesimista y optimista, con la implementación del parque vehicular con la tecnología FCEV al año 2050. También, para los parámetros económicos de los electrolizadores, generación eólica y solar son considerados dentro del estudio, que define los esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de H2V en Chile, desarrollado por implementa sur para la CORFO y el comité solar e innovación energética [23]. A continuación, en la Tabla 3-11 se detallan los parámetros de la Ecuación 3-3.

Tabla 3-11. Parámetros de la Ecuación 3-3 para escenarios y tecnologías.

Parametro	Detalle	Optimista (FCEV 50%)		Pesimista (FCEV10%)	
		Fotovoltaica	Eolica	Fotovoltaica	Eolica
P	Capacidad instalada del electrolizador [kW]	28.400.000	13.600.000	5.700.000	2.700.000
I	CAPEX electrolizador [USD/kW]	850	850	850	850
O	OPEX [% del CAPEX]	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%
FRC	Factor de recuperación de capital (8,5%)	0,106	0,106	0,106	0,106
Fp	Factor de planta electrolizador	24%	50%	24%	50%
H	Horas en un año	8.760	8.760	8.760	8.760
Q H ₂	Capacidad producción electrolizador [kg H2/h]	607.760	291.040	121.980	57.780
Q H ₂ O	Agua requerida [litro/kg H2]	8,9	8,9	8,9	8,9
C H ₂ O	Costo del agua [USD/litro]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Qe	Electricidad requerida [kWh/kg H2]	50	50	50	50
Ce	Costo electricidad [USD/kWh]	0,0268	0,028	0,0268	0,028
QO ₂	Producción Oxígeno [kg O2/ kg H2]	8	8	8	8
PO ₂	Precio de venta Oxígeno [USD/kg O2]	0,03	0,03	0,03	0,03

Fuente: Elaboración propia según escenarios y tecnologías.

En cuanto al factor de recuperación de capital requerido en la Ecuación 3-3, se define como un indicador en que mide el tiempo de recuperación del total de la inversión, y está dado por la Ecuación 3-4.

$$FRC = \frac{wacc * (1 + wacc)^N}{(1 + wacc)^N - 1}$$

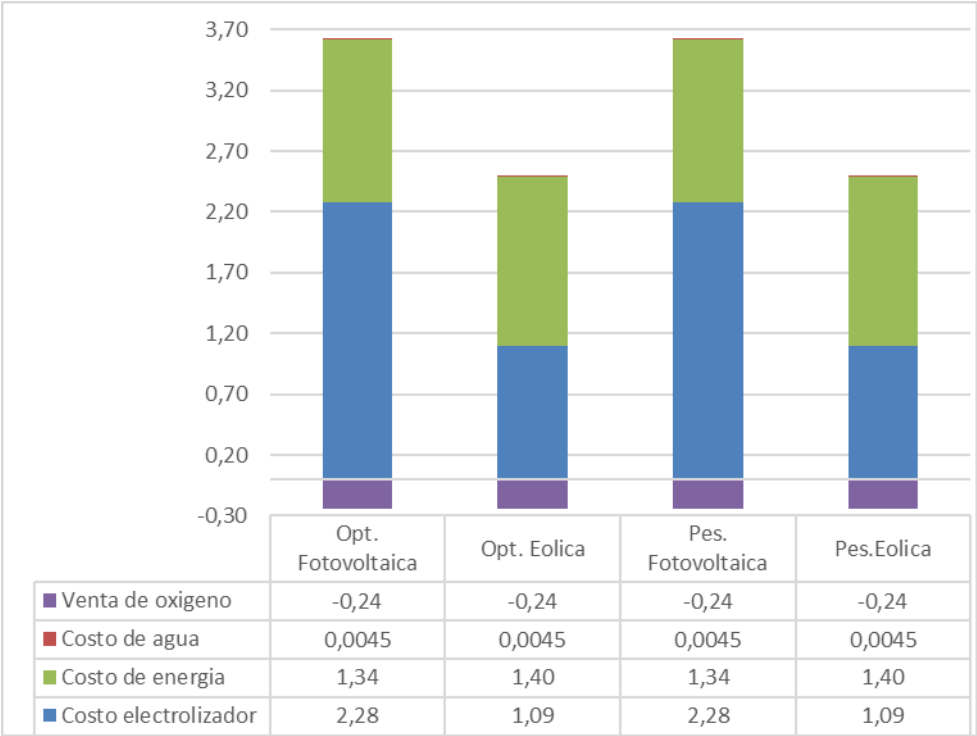
Fuente: Comisión nacional de energía.

Ecuación 3-4. Factor de recuperación de capital requerido.

Donde N es la vida útil del electrolizador, en este caso 20 años, y el termino wacc siendo la tasa de descuento, que corresponde a la tasa interna de retorno promedio ofrecida por el Banco Central de Chile, no puede ser interior al 7% ni superior al 10%, en este caso se utilizara la media de un wacc de 8,5%.

3.6 COSTOS ASOCIADOS

A partir de lo mencionado anteriormente, se obtiene que el LCOH no va a variar de valor en los diferentes escenarios, en cambio, si por la obtención de energía. Teniendo como resultado para el período del 2030 al 2050 un costo de hidrógeno de 3,38 [USD/ kg] para planta fotovoltaica y 2,26 [USD/ kg] para el recurso eólico. Cabe mencionar que se considera la venta de oxígeno como un subproducto del proceso, disminuyendo el valor en 0.24 [USD/ kg] H2, significando entre un 6.62% y 9,6% del costo total.



Fuente: Elaboración propia según Ecuación 3-3.

Figura 3-8 Detalle LCOH.

Tal como se observa en la Figura 3-8, dónde se pueden apreciar los distintos LCOH considerando la venta del oxígeno aparte, se identifica el escenario más económico con la

fuente de energía eólica. Dónde se le atribuye sobre el 56% de los costos a la energía eléctrica y alrededor del 44% del costo restante al electrolizador. Cabe mencionar que como anteriormente se había previsto, en la sección 3.2.13.1 el costo del agua llega a ser insignificante bordeando el 0,2% del costo total de la producción del hidrógeno. En cambio, tenemos el escenario fotovoltaico, correspondiendo el costo del electrolizador con alrededor 63% y el restante 37% del coste de la energía. Esto se debe principalmente a los factores de planta a los cuales pueden operar para la producción de energía eléctrica, atribuyéndole el alza, al aumento en la cantidad de los electrolizadores requeridos para cubrir la demanda de toneladas de hidrógeno requerida para el 2030.

Para tener una referencia de los resultados, se consultan a diferentes estudios donde determinan el valor del LCOH en un diferente contexto, recopilando la información y poniéndolo en la Tabla 3-12 que se muestra a continuación.

Tabla 3-12. Comparación de distintos resultados de LCOH.

Estudio	LCOH (USD/kg H2)	Observaciones
Resultados	3,38	Energía Solar
GIZ (2021)	3,25	Energía solar / Región de Antofagasta
Tractebel – Engie (2018)	3,0	Energía solar /Región de Antofagasta
Resultados	2,26	Energía Eólica
Julien Armijo IEA (2019)	2,16	Energía solar / Calama
Julien Armijo IEA (2019)	1,94	Energía Eólica / Patagonia chilena
Implementa sur (2019)	1,79	Energía Solar / Calama (2030)
Implementa sur (2019)	1,72	Energía Eólica / Patagonia chilena (2030)

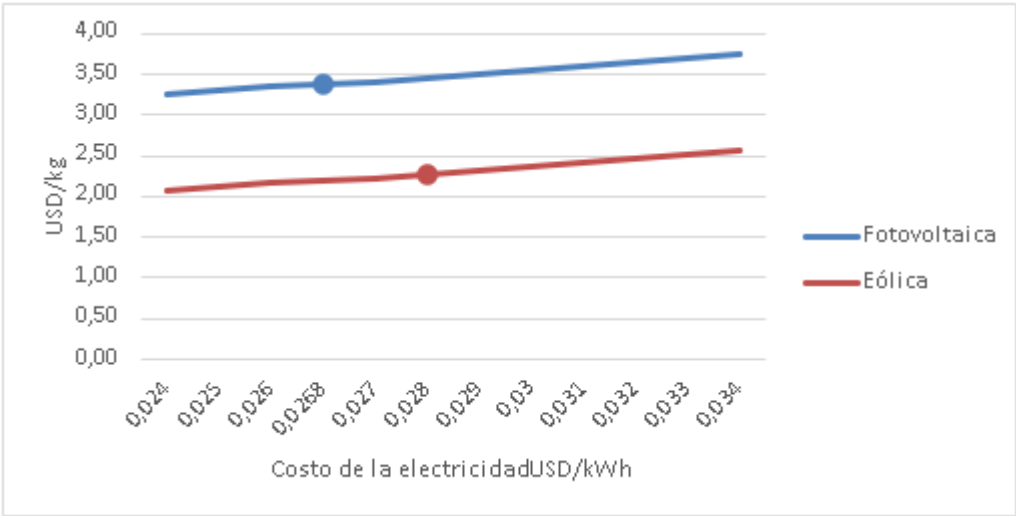
Fuente: Elaboración propia recopilando estudios de LCOH en Chile.

Los valores considerados de la tabla no cuentan con los gastos correspondientes a los procesos de compresión, almacenamiento y distribución. Sin embargo, el estudio de Implementa Sur [23], considera un costo adicional asumiendo los gastos necesarios de la cadena de producción, desde la salida del electrolizador hasta la estación de carga, evaluado en 3,39 [USD/kg] hoy en día, estimando que disminuya a 1,99 [USD/kg] al año 2030.

3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el propósito de identificar los factores que más inciden en los cálculos de los costos del hidrógeno, se evalúan los distintos parámetros utilizados para obtener el LCOH y analizar su comportamiento, según la variación de las variables de la Ecuación 3-3. Al identificar los distintos panoramas, es posible evaluar opciones más económicas y así reducir el costo total del hidrógeno verde.

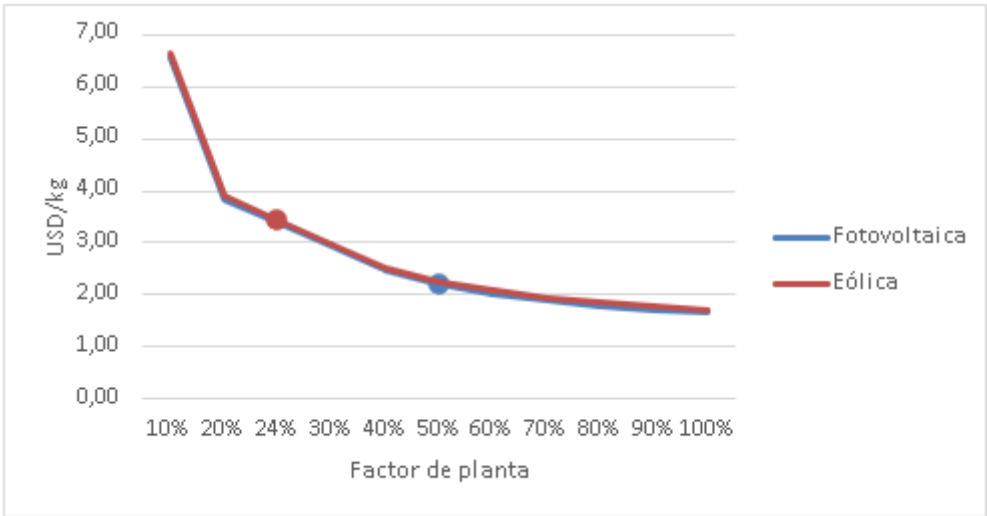
Para comenzar, se considera el valor más alto de la producción, la energía eléctrica que abarca cerca del 60% del costo total, se puede apreciar en la Figura 3-9, donde observa se la variación del LCOH en función de los costos de la electricidad.



Fuente: Elaboración propia según los datos de la Tabla 3-11

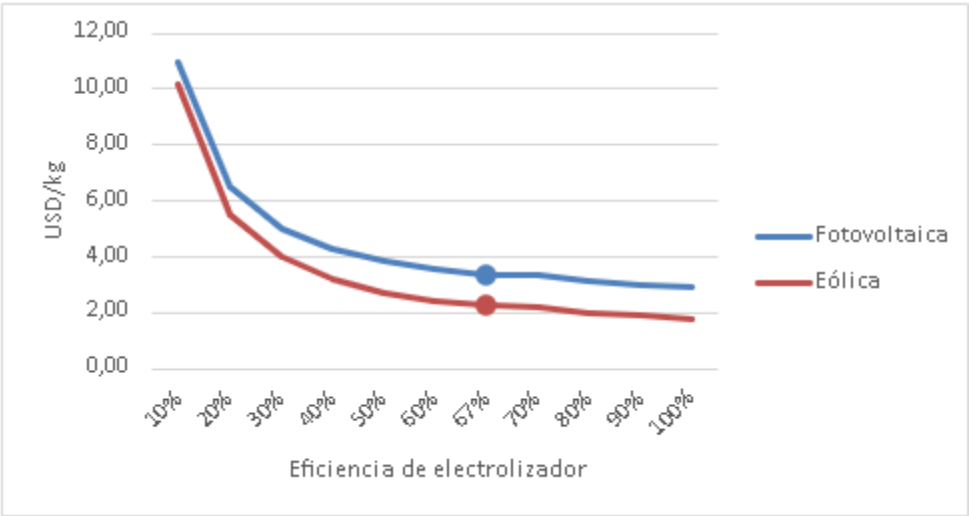
Figura 3-9. Análisis de sensibilidad para el costo de la electricidad

Otro factor que incide en la producción es el factor de planta, debido a que una planta, debido a que posee un factor más alto, lo que va a generar mayor energía eléctrica, influyendo directamente en el costo del hidrógeno, ya que al superar el 60% del factor el LCOH va a poseer un valor inferior a los 2 [USD/kg] de H2V, con los indicadores especificados en la sección 3.5.



Fuente: Elaboración propia según datos de la Tabla 3-11.

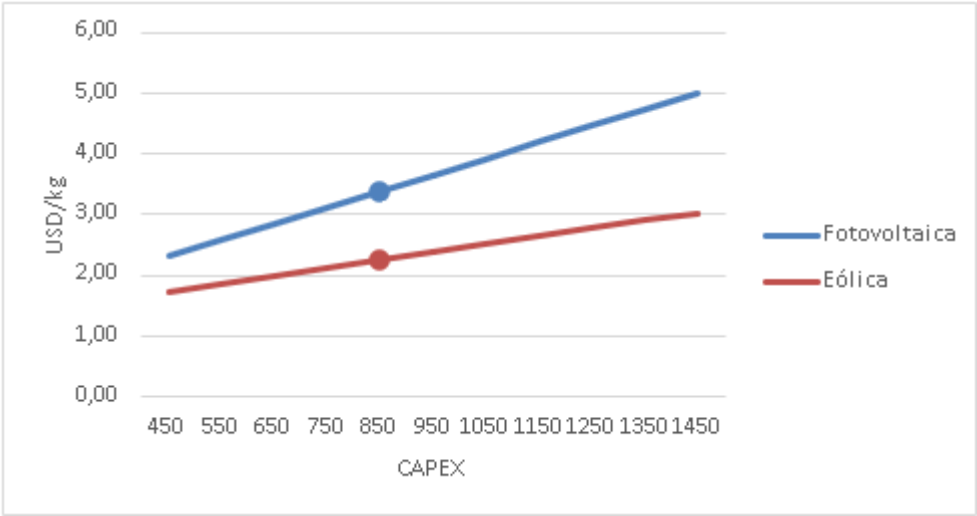
Figura 3-10. Análisis de sensibilidad para el factor de planta



Fuente: elaboración propia según parámetros de la Tabla 3-11.

Figura 3-11. Análisis de sensibilidad de eficiencia de electrolizador

Por otra parte, influye los valores asociados al electrolizador, la eficiencia de estos que se estima que con el paso del tiempo vaya aumentando hasta el 80% y sus costos disminuyan como se muestra en Figura 3-11. Además, la inversión de bienes de capital o CAPEX del electrolizador va a ir variando a través del tiempo a medida que haya inversión y desarrollo de tecnología afectando al LCOH, como se muestra en Figura 3-12.



Fuente: elaboración propia según parámetros de la Tabla 3-11

Figura 3-12. análisis de sensibilidad de CAPEX

3.8 COMPETITIVIDAD DEL LCOH CALCULADO

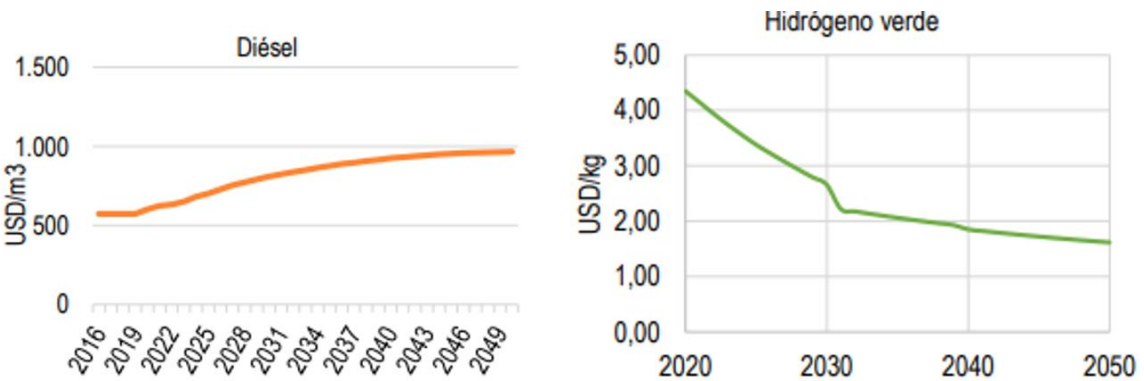
Para determinar si el precio del hidrógeno es competitivo actualmente en relación con el diésel, es necesario compararlos en el ámbito energético, es decir, su poder calorífico que corresponde a 33,33 [kWh/kg] y 10,30 [kWh/l] respectivamente, por lo tanto, se realiza una equivalencia entre un kg de hidrógeno y el diésel, esto determina que la energía contenida dentro de 1 kg de hidrógeno es de 3,2 veces un litro de diésel.

$$USD_{kgH_2} = 3,2 * USD_{lt\ diésel}$$

Fuente: Elaboración propia según densidad energética de combustibles.

Ecuación 3-5. Equivalencia energética de combustibles.

También cabe señalar, que el precio del diésel proyectado en el tiempo tiende a ir en alza, como se puede observar en la Figura 3-14, al ser un recurso no renovable, por lo tanto, cada vez más escaso. En cuanto a las proyecciones del precio del hidrógeno, se espera que será más bajo con el paso del tiempo, como lo mencionan la Figura 3-13, de un estudio realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Energía.



Fuente: Ministerio de energía y Ministerio medio ambiente.

Figura 3-13. Proyecciones precio de combustibles.



Fuente: CEPALSTAT – CEPAL – Naciones unidas.

Figura 3-14. Precio consumidor anuales Chile diésel [USD/l].

Por lo tanto, se realiza la equivalencia en el período estudiado con las proyecciones de los precios de estos combustibles como se observa en la Tabla 3-13. Los de la equivalencia son proyectados usando la Ecuación 3-5, cabe mencionar que los valores de la Tabla 3-13 no son los precio que se esperan para el consumidor, si no los de producción.

Tabla 3-13. Equivalencia de combustibles.

AÑO	Precio diésel [USD/m3]	Precio H2 [USD/kg]	Equivalencia [USD/ l diésel]
2030	800	2,6	2,4
2050	990	2,4	3,168

Fuente: Elaboración propia en base al cálculo en la Ecuación 3-5

3.9 **COSTOS IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA.**

Para poder comparar las distintas tecnologías del estudio y así tener una noción de las características técnicas, se estudiará un tractocamión tradicional, el cual cuenta con un recorrido anual de 120.000 kilómetros. Por lo que, se contrastaron camiones que tengan características semejantes, de las distintas tecnologías que implementan el hidrógeno verde, como se detalla a continuación en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14. Comparación de tecnologías para los tractocamiones

Parámetros	Combustión	Combustión Dual	FCEV
Consumo diésel Anual [l]	45.761,53	18.304	-
Consumo de hidrógeno [kg]	-	7.876,84	13.128,07
Rendimiento energético	42%	42%	49%
Rendimiento	2,6 [km/l]	-	9,06 [km/kg]
Potencia [kW]	317	-	303

Fuente: The international council on clean transportation

Con el fin de comparar las características técnicas de las tecnologías se analiza cada caso, para el camión con motor de combustión dual, se evaluó el acondicionamiento de un camión tradicional a uno que utiliza GLN, mientras que el camión a celda de combustible (FCEV), se utilizó la comparación de un camión BEV.

Para estimar la evaluación económica, se valorarán los costos que implica obtener un activo fijo de tracto camión convencional y compararlo con las tecnologías evaluada en el estudio. Además, se valorarán los costos que implica la estructura del transporte de carga terrestre nacional, en bases a la revisión de los antecedentes obtenidos de la

actualización de modelo de costos de transporte de carga para el análisis de costos logísticos [24], considerando el alza del IPC a la fecha (junio 2023).

A partir de lo anterior, se define la inversión para un proyecto de 7 años, que será financiado con capital propio, teniendo en cuenta la adquisición de un modelo nuevo de camión convencional y de FCEV, que cumplan con similares características, valorados en \$175.000 [USD] y \$258.000 [USD] [25]. En cambio, para la tecnología de combustión dual se hará la adquisición de un vehículo de segunda mano con 3 años de uso (57% del valor original, según depreciación SII), considerando un kit de reacondicionamiento y el respectivo estanque de almacenamiento, resultando una inversión de \$109.863 [USD].

Teniendo en cuenta que los vehículos se implementan en una organización ya instaurada, que cuente con infraestructura, administración y la gestión necesaria. Se tiene en cuenta los costos que aumentarían en una tasa del 2% anual, los costos fijos como gastos por sueldos de personal y costos de circulación y por otra parte, los costos variables que incluye el consumo de combustible y la mantención de los vehículos, que son explicado a continuación:

- Consumo de combustible.

Se define en base a los consumos de combustibles y los valores de estimado anteriormente, siendo para el hidrógeno los promedio de la Tabla 3-12 más los costos de distribución. En cambio, para el diésel se estima con el comportamiento de la Figura 3-14 de los precios de consumidor. Definiendo el costo anual según la Ecuación 3-6.

$$C = \sum CA_b * P_b$$

Fuente: Elaboración propia, según parámetros establecidos.

Ecuación 3-6. Costo combustible.

Donde:

C: Costo anual combustible. [USD]

CA: Consumo anual combustible. [l] [kg]

P: Precio combustible. [USD/l] [USD/kg]

b: Tipo de combustible.

- Costos de circulación.

En este inciso se considera el precio por concepto de permiso de circulación, revisión técnica y seguros.

-Permiso de circulación: Está definido por decreto de ley del Ministerio de Interior, en el caso de tractocamiones y semirremolque de más de 10 toneladas equivale a 1,5 [UTM] al año.

-Revisión técnica: Se considera las tarifas de planta de revisión técnica a lo largo del país, conforme registro del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, con un promedio de \$19.650 para vehículo convencionales y \$23.450 para vehículos que utilicen GNC o GLC (considerado para vehículos H₂).

- Seguros: Los vehículos de transporte de carga se le adjudica el seguro obligatorio y de otro tipo, que incluyen seguros a la carga, por daños a terceros y de responsabilidad civil. El primero, fluctúa entre \$6.830 y \$8.720, por lo que para este caso se consideran \$10.000. En cambio, para los seguros adquiridos, se ha tomado la referencia de diferentes compañías, valorándolo en un gasto mensual de \$201.380.

- Sueldo del personal.

Los trabajadores son los involucrados en la operación de los vehículos, por lo que se considera un sueldo base más comisiones como viáticos, colación, seguros, etc. Considerando un sueldo bruto mensual \$1.700.000, como se detalla en el Anexo 5.

- Mantención de los vehículos.

Los costos de mantención de los vehículos de carga se le asocia tres grupos principales.

-Neumáticos: Debido a las distancias que recorre el vehículo y el desgaste por el uso, es necesario cambiar periódicamente los neumáticos. Con una vida útil de 100.000 a 200.000 kilómetros, se considerará la reposición anual con un valor promedio de \$220.000 cada uno (6).

-Pauta de mantenimiento: Indispensable dentro de la mecánica automotriz, prolongan la vida útil del vehículo, por lo que se incluye aceite de motor, aceite de caja de cambios y aceite del diferencial. El costo y cambio de estos elementos va a estar dado por la pauta de mantenimiento del vehículo que recomiende el fabricante, mostrándose con mayor detalle en el Anexo 6, Anexo 7 y Anexo 8.

-Servicio de mantenimiento: El ítem incluye todas las mantenciones adicionales a los dos puntos mencionados anteriormente. Este tipo de mantención va a tomar en cuenta el recambio de piezas menores y el costo de obra relacionado, valorado en 1,45 [USD/km] según el modelo de costos de transporte de carga anteriormente mencionado. Para la combustión dual se considera un sobredimensionamiento de 2 [USD/km], debido a lo que puede implicar el reacondicionamiento de un vehículo y para FCEV de 1,25 [USD/km] por su menor necesidad de mantenimiento.

La depreciación ayuda a reconocer el desgaste que sufre el activo por la utilización, se va a calcular en base a el precio de compra (definido anteriormente), la vida útil establecida en 7 años por el SII y el valor residual de un 31% al fin de este período.

Por último, cabe mencionar que se estima un ingreso de capital de unos \$110.000 [USD], con una tasa de crecimiento anual de un 5%, observando los ingresos de un camión mensual (Anexo 5).

Considerando los parámetros anteriores, se realiza un flujo de caja que registre las salidas y entradas de capital, para las características de cada vehículo. Obteniendo los indicadores económicos para cada caso, resumiendo los resultados en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15. Indicadores económicos.

Indicador	Convencional	Comb. Dual	FCEV
TMAR	12%	12%	12%
VAN	\$48.927,11	\$100.202,58	\$7.934,57
TIR	19%	34%	13%
Payback	4 años y 2 meses	2 años y 11 meses	5 años y 1 mes
TCO	\$687.353	\$ 607.196	\$730.299

Fuente: Elaboración propia, según flujo de caja.

3.10 **COMPLEMENTO FINANCIERO**

El país ha iniciado la cooperación con la Unión Europea para la contribución del desarrollo de la industria del hidrógeno verde en nuestro territorio, contando con dos nuevas iniciativas para las acciones de cooperación. La primera de esta, la iniciativa “Team Europe” busca el desarrollo de este elemento en el país, proporcionando proyectos de asistencia técnica que fortalecerá las condiciones para el fomento de la economía, desarrollo de capacidades, tecnologías y una creación de fondos para financiar proyectos de producción, aportando la suma de 8 millones de euros. Por otra parte, se anunció la creación del “Fondo Team Europe de Hidrógeno Renovable en Chile”, que tiene el fin de constituir un mecanismo que canalizará el financiamiento para el desarrollo de proyectos de producción y uso, contribuyendo con 16,5 millones de euros y 200 millones en crédito que serán gestionados por la CORFO para el desarrollo de este elemento. En total se adquiere la suma de 225 millones de euros para el desarrollo de proyectos concretos de producción y aplicaciones de hidrógeno renovable en Chile.

El Banco Mundial, incentivando el crecimiento verde del país, ha colaborado con el Estado chileno con su primer préstamo de este tipo a nivel global para promover y acelerar la industria del hidrógeno verde. Aprobando un préstamo de 150 millones [USD], el cual será implementado por la CORFO para destinarlo a un fondo de financiamiento mixto público y privado. Además, se espera que el instrumento financiero levante recursos adicionales del sector privado que puedan generar inversiones por al menos 280 millones [USD], con el fin de reducir la incertidumbre del mercado y mitigar el riesgo, para mejorar las condiciones financieras.

3.11 INCENTIVOS TRIBUTARIOS PARA EL DESARROLLO DEL H2V

Se recopilan los incentivos que podrían utilizar las empresas que pretendan iniciar el fomento del H2V. El primero, relacionado con investigación y el desarrollo, la ley N° 20.241 de 2008 establece un incentivo tributario a la inversión privada en investigación y desarrollo. La cual establece beneficios dirigidos a contribuyentes del IDPC (Impuesto de primera categoría) que precise sus resultados tributarios a partir de una contabilidad completa, las principales características son:

- Aplicación de beneficios tributarios por gastos internos.
- Créditos tributarios equivalentes al 35% del gasto, con tope de 15.000 [UTM] por contribuyente.
- Postergación del crédito anterior, para empresas con pérdida tributaria.
- Utilización del 65% restante para producir la renta.
- Complementar con otros financiamientos públicos.
- Realizar inversiones en proyectos de manera asociativa.

En segundo lugar, tenemos la extensión del artículo 12 letra B, N° 10 de la Ley 825, que indica que estarán exentas de IVA las importaciones realizadas por personas naturales o jurídicas sean residentes o domiciliadas del país o los que califiquen como inversionistas extranjeros y empresas receptoras. Conforme a lo establecido en el artículo 3 de la ley marco para la inversión extranjera directa en Chile. Respecto de los bienes de capital importado que se destinen al desarrollo, exploración o explotación en Chile, de proyectos destinados a la industria energética, desarrollo tecnológico, científico que implique una inversión por un monto igual o superior a cinco millones de dólares.

El artículo 6° de la Ley N° 18.502, establece un impuesto específico a los combustibles de acuerdo con los metros cúbicos de la primera venta o importación, en el caso del petróleo diésel de 1,5 [UTM] por [m³], aunque este impuesto se puede recuperar en distintos mecanismos, como lo es con las empresas de transporte de carga (Ley 19.764) que les permite recuperar un 25% de este impuesto. A pesar de considerar los distintos combustibles, dentro de la legislación no toma en cuenta la utilización del hidrógeno verde generándose un vacío legal, sin embargo, considerando las características de esta ley el H2V no estaría dentro de la categoría, ya que, sería un combustible verde de producción nacional. Por último, cabe mencionar que en Chile no existe una regulación legal integral de la materia, si no que se han hecho distintas leyes y decretos abarcando los diferentes aspectos sobre la tributación de los combustibles en general.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Como solución al cambio climático se presenta el hidrógeno verde como una alternativa nacional para la producción de energía, teniendo como resultado emisiones de vapor de agua, ayudando a la vez a la descarbonización de la matriz energética. La transición del diésel al hidrógeno como combustible, permite posicionar al país como productor de su propio combustible y así lograr disminuir la dependencia que Chile tiene hacia este combustible fósil.

La dependencia del transporte carretero de carga ha sido la alternativa más utilizada para la transportación de mercancía por carretera para el comercio y el patrimonio del país, lo que lo convierte en indispensable para el movimiento de bienes, con más de 200.000 vehículos inscritos, representa una oportunidad para desarrollar e implementar el hidrógeno verde como lo estipula la estrategia nacional del hidrógeno, proyectando un mercado potencial de 2 billones de [USD]. La demanda actual del parque vehicular llega a los 4.412 millones de litros al año, siendo el responsable del 42% de las emisiones del transporte terrestre, esperando que para el 2050 la demanda de diésel supere los 8.000 millones de litros para estos vehículos.

El hidrógeno es capaz de cubrir esta demanda energética con menor combustible, implementándose en los motores de combustión combinado con el diésel o una alternativa sin emisiones, como lo son las celdas de hidrógeno. Aplicando estas tecnologías, se ataca la reducción de GEI a medida que se implementen al parque vehicular como se demostró en los distintos escenarios, proyectando resultado al 2050, donde se plantea la meta carbono neutralidad. En el caso optimista, se espera una reducción de 11 millones de toneladas de CO₂ (FCEV) y 7 millones de toneladas en la combustión dual, significando un 17,47 % y 10,48% respectivamente, de las emisiones que se buscan mitigar para ese año, para el caso pesimista se reduce un 3,49 % (FCEV) y 2,10% (combustión dual) de la meta neutral.

Para cumplir con la demanda del hidrógeno, se tuvo en cuenta la cadena de valor de la producción de este elemento, cerciorando de que el proceso tenga cero emisiones. Evaluando 2 diferentes alternativas de obtención de energía, con las características técnicas que benefician al proceso y se obtengan los márgenes reducidos. El costo nivelado de hidrógeno (LCOH), dio como resultado en el caso fotovoltaico valores de 3,38 y dólares por kilogramo de H₂V, mientras que, el de menor costo fue el caso del parque eólico que se obtuvo un LCOH de 2,26 [USD/kg], considerando la venta de oxígeno como subproducto del proceso de electrólisis. En cuanto a los costos, se le pueden atribuir para el parque eólico el 60% a la energía y el 40% restante al electrolizador, mientras que el agua se consideró insignificante debido a que abarca el 0,2% del valor, en el caso fotovoltaico ocurre lo contrario.

La competitividad del precio del diésel en comparación con el del hidrógeno estará dado por las proyecciones de estos a futuro. En el caso del primero, al ser un combustible fósil no renovable, tiende a ir en alza al contrario del hidrógeno verde. Es por esto, por lo que se estima los costos para el año 2030 que el hidrógeno comenzará a poseer un rango de competitividad, con un precio de 2,6 [USD] frente a 2,4 [USD] del diésel. En cambio, para el año 2050 el precio del hidrógeno será menor de 2,5 [USD] frente a 3,2 [USD] de su competidor, llegando a ser más competitivo por sus características y precio.

En cuanto a la implementación de vehículos con tecnología de hidrógeno para el transporte de carga, se analiza económicamente 3 alternativas detallada en la sección 3.9. Como resultado se obtuvo que las tres alternativas son viables económicamente, ya que cuentan con un VAN positivo y la TIR es mayor que la tasa de descuento, recuperando la inversión después de un tiempo (payback). Sin embargo, la alternativa de combustión dual es la que presenta cuantitativamente la mejor opción, debido a que posee el VAN más alto con una TIR superior en casi tres veces la tasa de descuento. Además, es la que presenta un menor tiempo de recuperación de la inversión, con un costo total de propiedad más bajo que su competencia. Por otra parte, le sigue la opción de un tracto camión convencional, que al igual que el anterior es económicamente rentable, pero con menores ganancias. Por último, la opción de un vehículo de carga FCEV representa la alternativa menos provechosa, si bien es rentable, sus indicadores muestran que requiere de un mayor tiempo de recuperación de inversión con una TIR resultante similar a la tasa de descuento, por lo que se recomienda las alternativas anteriores.

Analizando lo anterior, estimamos que uno de los factores que más incide en el flujo de caja es la inversión inicial para el proyecto. Si bien, al utilizar un vehículo de FCEV se reduce los costos variables (mantención y combustible), la inversión inicial significa \$83.000 [USD] más para la adquisición del vehículo. En cambio, la combustión dual presenta una disminución de los costos variable y de inversión inicial, comparándolo con el vehículo tradicional.

Para evidenciar el desarrollo del estudio, es necesario impulsar y potenciar proyectos piloto que demuestren la realidad de la evaluación técnica y económica. De acuerdo con la estrategia nacional, se plantean la implementación de los primeros camiones de ruta al año 2030, siendo los FCEV la alternativa que presenta el mercado hoy en día. Aunque la alternativa de motores de combustión dual sigue siendo una opción para reacondicionar el parque vehicular actual, es necesario continuar con la implementación de programas de investigación y el financiamiento para el desarrollo de los proyectos prototipos que cumplan con todos los estándares de seguridad, reuniendo a distintos actores del ámbito público como privado para obtener los mejores beneficios de esta tecnología, ya que hoy no se encuentran dentro de la normativa, que le impide su circulación.

Por otra parte, es esencial la formación de un cuerpo de especialistas con conocimiento y capacidades técnicas para fortalecer el ecosistema local del hidrógeno, para esto es imprescindible levantar competencias y habilidades requeridas en instituciones de educación nacional, contando con la colaboración de distintos pilares del ámbito público - privado para generar una hoja de ruta que determine hitos, pilotos y actividades, para planificar el desarrollo del conocimiento a medida que crece la industria y la demanda en el sector tecnológico.

Además, es necesario una normativa que regule y garantice la seguridad en los procesos de producción, distribución, almacenamiento y estaciones de carga, ya que hoy, se cataloga solamente dentro de las sustancias peligrosas, tomando de referencias acciones regulatorias internacionales de países que tengan los mismos objetivos que Chile, identificando las brechas necesarias para tipificar este combustible. Precizando en la estandarización de protocolos que indique los requisitos mínimos para las instalaciones y operaciones de este producto, estableciendo un organismo estatal, como el Ministerio de Energía o de Medio Ambiente, que certifique la producción de hidrógeno verde libre de emisiones de gases de efecto invernadero. Siendo obligatorio presentar una evaluación de impacto ambiental (EIA), según la ley 19.300 mencionada en la sección 1.6 significando que no existe un riesgo para la sociedad ni el medio ambiente.

Chile se puede convertir en uno de los propulsores de la industria del H2V internacionalmente, marcando un hito en la implementación en camiones destinados al transporte de carga de una forma sustentable, creando una red de energía renovables a lo largo del territorio nacional, aportando a la generación de empleos a la comunidad, aumentando el PIB y consiguio la economía del país. Aunque se espera que esta industria sea competitiva dentro de unos 10 años, la implementación dentro de la cadena de valor del hidrógeno va a significar una mayor inversión en su fase inicial, donde actualmente ha recibido el financiamiento de la Unión Europea y el Banco Mundial promoviendo el desarrollo de la industria, esperando que disminuya los costos a medida que evoluciona la producción y las tecnologías. No obstante, aún existen vacíos legales y aristas inconclusas, que quedan por trabajar.

Por último, cabe destacar que la implementación del hidrógeno verde en el transporte de carga terrestre realmente representa una solución sustentable a las metas de carbono neutralidad al año 2050. Determinando en los cálculos, en su mejor escenario, se podría llegar a reducir 11 millones de toneladas de CO₂ equivalente, significando la disminución de un 17% de los gases de efecto invernadero que se buscan mitigar para ese año.

Se espera que la investigación entregue información valiosa para los responsables del área e interesados en explorar las oportunidades de este elemento, que deban tomar alguna decisión al respecto, sirviendo como un marco sólido para informar y respaldar alguna estrategia en el contexto actual y/o a futuro.

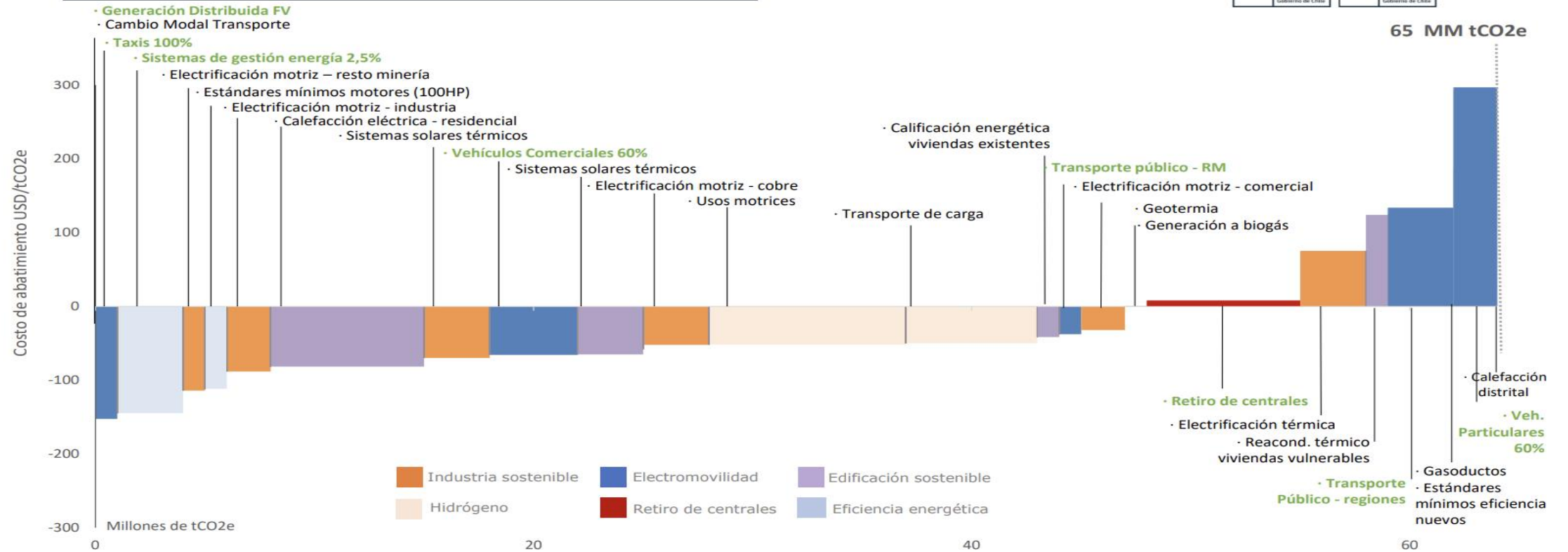
ANEXOS

CUADRO 3.2.2 FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO DE N ₂ O Y CH ₄ DEL TRANSPORTE TERRESTRE Y RANGOS DE INCERTIDUMBRE ^(a)						
Tipo de combustible / Categoría representativa de vehículo	CH ₄ (kg/TJ)			N ₂ O (kg/TJ)		
	Por defecto	Inferior	Superior	Por defecto	Inferior	Superior
Gasolina para motores – sin controlar ^(b)	33	9,6	110	3,2	0,96	11
Gasolina para motores – catalizador de oxidación ^(c)	25	7,5	86	8,0	2,6	24
Gasolina para motores – vehículo para servicio ligero con poco kilometraje, modelo 1995 o más nuevo ^(d)	3,8	1,1	13	5,7	1,9	17
Gas / Diesel Oil ^(e)	3,9	1,6	9,5	3,9	1,3	12
Gas natural ^(f)	92	50	1 540	3	1	77
Gas licuado de petróleo ^(g)	62	na	na	0.2	na	na
Etanol, camiones Estados Unidos ^(h)	260	77	880	41	13	123
Etanol, automóviles, Brasil ⁽ⁱ⁾	18	13	84	na	na	na
Fuentes: USEPA (2004b), AEMA (2005a), TNO (2003) y Borsari (2005) CETESB (2004 & 2005) con las hipótesis que se presentan a continuación Se derivaron los rangos de incertidumbre de los datos incluidos en Lipman y Delucchi (2002), con excepción del etanol en los automóviles. (a) Con excepción de los automóviles que funcionan con GLP y etanol, los valores por defecto se derivan de las fuentes indicadas con los valores VCN declarados en el capítulo Introducción del volumen Energía, los valores de densidad declarados por la Administración de Información de Energía de Estados Unidos; y los siguientes valores de consumo de combustible supuestos y representativos: 10 km/l para los vehículos con motores para gasolina; 5 km/l para los vehículos diesel; 9 km/l para los vehículos a gas natural (se supone que es equivalente a los vehículos a gasolina); 9 km/l para los vehículos que funcionan con etanol. Si están disponibles los valores reales y representativos de la economía del combustible, se recomienda utilizarlos con los datos de uso total de combustible, para estimar los datos totales de distancias recorridas, que luego deben multiplicarse por los factores de emisión del Nivel 2 para N₂O y CH₄. (b) El valor por defecto sin controlar de la gasolina para motores se basa en el valor de USEPA (2004b) para un vehículo ligero a gasolina de los Estados Unidos (automóvil): sin controlar, convertido con los valores y las hipótesis descritos en la nota (a) del cuadro. Si las motocicletas representan una parte significativa de la población nacional de vehículos, los compiladores del inventario deben ajustar hacia abajo el factor de emisión por defecto dado. (c) Gasolina para motores: el valor por defecto del catalizador de oxidación de los vehículos ligeros se basa en el valor de USEPA (2004b) para un vehículo ligero a gasolina de los Estados Unidos (automóvil): catalizador de oxidación, convertido con los valores y las hipótesis descritos en la nota (a) del cuadro. Si las motocicletas representan una parte significativa de la población nacional de vehículos, los compiladores del inventario deben ajustar hacia abajo el factor de emisión por defecto dado. (d) Gasolina para motores: el valor por defecto de los vehículos ligeros modelo 1995 o más nuevos se basa en el valor de USEPA (2004b) para un vehículo ligero a gasolina de los Estados Unidos (automóvil): Nivel 1, convertido con los valores y las hipótesis descritos en la nota (a) del cuadro. Si las motocicletas representan una parte significativa de la población nacional de vehículos, los compiladores del inventario deben ajustar hacia abajo el factor de emisión por defecto dado. (e) El valor diesel por defecto se basa en el valor de la AEMA (2005a) para un camión pesado diesel europeo, convertido con los valores y las hipótesis descritos en la nota (a) del cuadro. (f) Los valores por defecto e inferiores del gas natural se basaron en un estudio de TNO (2003), realizado usando vehículos europeos y ciclos de pruebas en los Países Bajos. Hay mucha incertidumbre para el N₂O. La USEPA (2004b) tiene un valor por defecto de 350 kg CH₄/TJ y 28 kg N₂O/TJ para un automóvil de GNC de Estados Unidos, convertido usando los valores y las hipótesis descritos en la nota (a) del cuadro. Los límites superior e inferior también fueron tomados de USEPA (2004b) (g) El valor por defecto para las emisiones de metano del GLP, considerando para un valor de calefacción bajo de 50 MJ/kg y se obtuvo 3,1 g CH₄/kg GLP de TNO (2003). No se proporcionaron rangos de incertidumbre. (h) El valor por defecto del etanol se basa en el valor de la USEPA (2004b) para un camión pesado a etanol de Estados Unidos, convertido con los valores y las hipótesis descritos en la nota (a) del cuadro. (i) Datos obtenidos en vehículos brasileños por Borsari (2005) y CETESB (2004 & 2005). Para los modelos 2003 nuevos, el mejor caso es: 51,3 kg THC/TJ combustible y 26,0 por ciento de CH₄ en THC. Para los vehículos de 5 años de antigüedad: 67 kg THC/TJ combustible y 27,2 por ciento de CH₄ en THC. Para los de 10 años de antigüedad: 308 kg THC/TJ combustible y 27,2 por ciento de CH₄ en THC.						

Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero;
Capítulo 3: Combustión móvil.

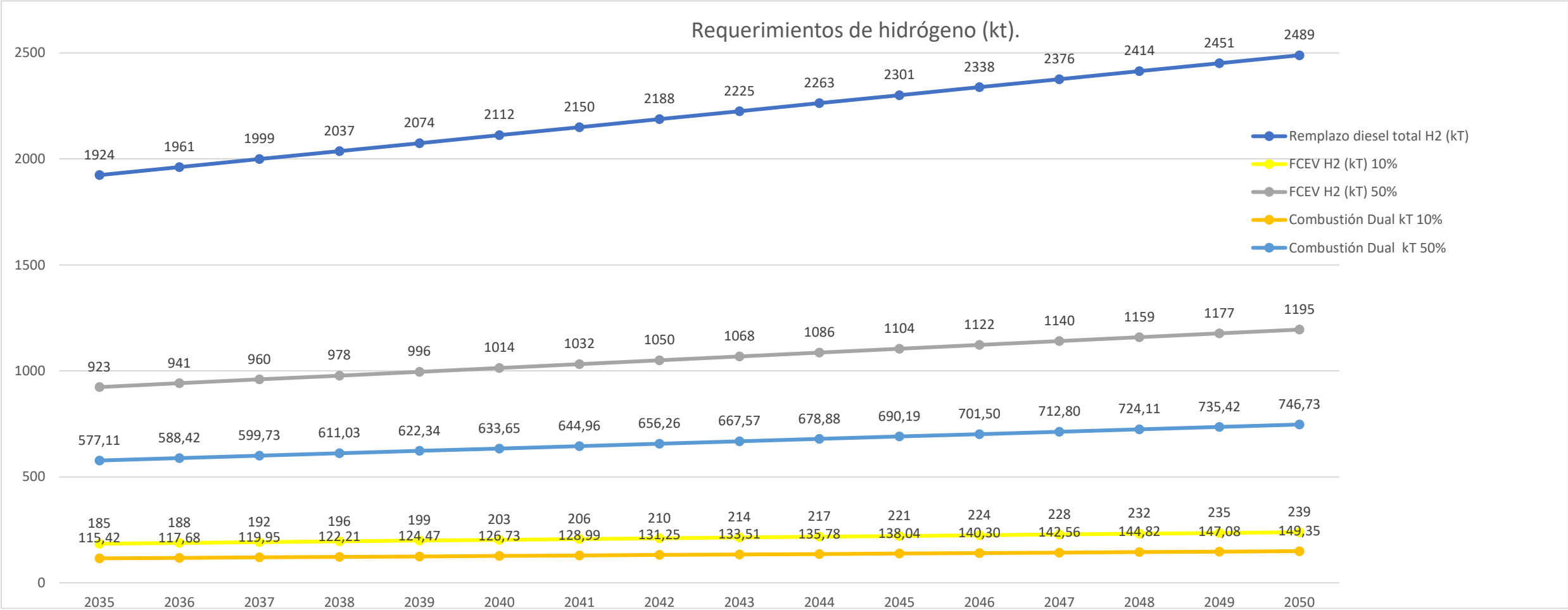
Anexo 1. Consideraciones factor de emisiones N₂O y CH₄.

Curva de costos de mitigación



Fuente: Ministerio de energía y Ministerio de medio ambiente

Anexo 2. Curva de costos de mitigación.



Fuente: Elaboración propia en base a escenarios determinados en sección 2.3.

Anexo 3. Demanda de hidrógeno.

TABLA A-1

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

Sustancia	Fórmula	Masa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante de gas, <i>R</i> kJ/kg · K*	<i>Propiedades del punto crítico</i>		
				Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, m³/kmol
Agua	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Aire	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Alcohol metílico	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Amoniaco	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argón	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benceno	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromo	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Cloro	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Cloroformo	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Cloruro metílico	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Criptón	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Dióxido de sulfuro	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Etano	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Etileno	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helio	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexano	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hidrógeno (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Metano	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Monóxido de carbono	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Neón	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrógeno	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Óxido nitroso	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxígeno	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propano	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propileno	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Xenón	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*La unidad en kJ/kg · K es equivalente a kPa · m³/kg · K. La constante de gas se calcula de $R = R_u/M$, donde $R_u = 8.31447$ kJ/kmol · K y M es la masa molar.

Fuente: K. A. Kobe y R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; y ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, Inc., 1993), pp. 16.4 y 36.1.

Fuente: Termodinámica, Séptima edición. Y. Cengel, M. Boles.

Anexo 4. Tabla de propiedades.

RUT [REDACTED]
[REDACTED] VALPARAISO

MES: MAYO DEL 2023
CONDUCTOR: [REDACTED]
RUT: [REDACTED]

24/11/2021

30	SUELDO BASE	440.000	440.000	
	BONO DE PRODUCCION		270.200	
	GRATIFICACION		174.167	
	TIEMPOS DE ESPERA	88 HORAS	322.667	
	SEMANA CORRIDA		159.017	
	ESTADIA		-	
1	PORTEOS		275.000	
	TOTAL IMPONIBLE		1.641.050	
	ASIG.FAMILIAR			
	VIATICOS		234.000	
	SDO RENDICIONES A FAVOR		-	
	REPOSICION TARJETA		0	
	TOTAL HABERES		1.875.050	
	DESCUENTOS PREVISIONALES		328.862	1.331.384
	11,27 HABITAT	184.946		
	7% SALUD FONSA	114.874		
	0,60% CESANTIA	9.846		
	DIFERENCIA ISAPRE			
	IMPUESTO UNICO	19.195		
	OTROS DESCUENTOS		375.500	
	SALDO CONTRA RENDICIONES	41.500		
	PRESTAMO INTERNO	-		
	ANTICIPO VIATICOS	234.000		
	PRESTAMO INTERNO	100.000		
	APORTE ENFERMOS	-		
	SALDO CONTRA RENDICIONES	-		
	TOTAL DESCUENTOS		704.362	
	ALCANCE LIQUIDO		1.170.688	
	ANTICIPOS		120.000	
	LIQUIDO A PAGAR		1.050.688	1.312.188

SON: UN MILLON CINCUENTA MIL SEISCIENTOS OCHENTA Y OCHO PESOS

C

FIRMA CONDUCTOR

VIAJE		GASTOS		REMESAS
1		21.600	100.000	100.000
2		15.000		100.000
3		29.900		100.000
4		20.000		100.000
5		18.000	100.000	
6		10.000		
7		18.000		
8		15.000		
9		18.300	100.000	
10		18.300		
11		18.300		
12		18.300		
13		29.600		
14		20.500	100.000	
15		25.100		
16		16.000		
17		18.300		
18		28.300		
		"		
TOTALES		358.500	400.000	- 400.000

41,500

(78.400)
(63.400)
(33.500)
(13.500)
(95.500)
(85.500)
(67.500)
(52.500)
(134.200)
(115.900)
(97.600)
(78.300)
(49.700)
(129.200)
(104.100)
(88.100)
(69.800)
(41.500)
(41.500)
(41.500)
41.500

Anexo 5. Líquidaciones Remuneraciones.

VALOR HH CONCESIONARIO	45000																						
	AÑO 1			AÑO 2			AÑO 3			AÑO 4			AÑO 5			AÑO 6			AÑO 7				
Kilómetros	40000	80000	120000	160000	200000	240000	280000	320000	360000	400000	440000	480000	520000	560000	600000	640000	680000	720000	760000	800000	840000		
Mano de obra	2,9	3,4	6,8	3,4	2,9	7,4	2,9	3,4	6,8	3,4	2,9	7,4	2,9	3,4	6,8	3,4	2,9	7,4	2,9	3,4	6,8		
	\$ 130.500	\$ 153.000	\$ 306.000	\$ 153.000	\$ 130.500	\$ 333.000	\$ 130.500	\$ 153.000	\$ 306.000	\$ 153.000	\$ 130.500	\$ 333.000	\$ 130.500	\$ 153.000	\$ 306.000	\$ 153.000	\$ 130.500	\$ 333.000	\$ 130.500	\$ 153.000	\$ 306.000		
Repuestos																							
Filtro de aceite	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703	\$ 65.703		
Golilla carter	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239	\$ 1.239		
Filtro de combustible	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923	\$ 24.923		
Filtro racor	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188	\$ 28.188		
Filtro de aire primario	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436	\$ 63.436		
Filtro de aire secundario	-	\$ 52.976	-	\$ 52.976	-	\$ 52.976	-	\$ 52.976	-	\$ 52.976	-	\$ 52.976	-	\$ 52.976	-	\$ 52.977	-	\$ 52.978	-	\$ 52.979	-		
Filtro de polen	-	\$ 17.341	-	\$ 17.341	-	\$ 17.341	-	\$ 17.341	-	\$ 17.341	-	\$ 17.341	-	\$ 17.341	-	\$ 17.342	-	\$ 17.343	-	\$ 17.344	-		
Filtro secador	-	-	\$ 18.617	-	-	\$ 18.617	-	-	\$ 18.617	-	-	\$ 18.617	-	-	\$ 18.617	-	-	\$ 18.617	-	-	\$ 18.617		
Empaquetadura tapa de válvulas	-	-	\$ 18.240	-	-	\$ 18.240	-	-	\$ 18.240	-	-	\$ 18.240	-	-	\$ 18.240	-	-	\$ 18.240	-	-	\$ 18.240		
Correa	-	-	\$ 45.743	-	-	\$ 45.743	-	-	\$ 45.743	-	-	\$ 45.743	-	-	\$ 45.743	-	-	\$ 45.743	-	-	\$ 45.743		
Filtro adblue	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640	\$ 27.640		
Lubricantes																							
Aceite 10w40 (42 l)	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439	\$ 131.439		
Aceite transmisión 75w90 (14,5 l)	-	-	\$ 188.150	-	-	\$ 188.150	-	-	\$ 188.150	-	-	\$ 188.150	-	-	\$ 188.150	-	-	\$ 188.150	-	-	\$ 188.150		
Aceite diferencial 75w80 (12 l)	-	-	\$ 59.595	-	-	\$ 59.595	-	-	\$ 59.595	-	-	\$ 59.595	-	-	\$ 59.595	-	-	\$ 59.595	-	-	\$ 59.595		
Aceite de dirección	-	\$ 30.600	-	\$ 30.601	-	\$ 30.602	-	\$ 30.603	-	\$ 30.604	-	\$ 30.605	-	\$ 30.606	-	\$ 30.607	-	\$ 30.608	-	\$ 30.609	-		
Refrigerante	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884	\$ 117.884		
TOTAL	\$ 590.952	\$ 714.369	\$ 1.096.797	\$ 714.370	\$ 590.952	\$ 1.224.716	\$ 590.952	\$ 714.372	\$ 1.096.797	\$ 714.373	\$ 590.952	\$ 1.224.719	\$ 590.952	\$ 714.375	\$ 1.096.797	\$ 714.378	\$ 590.952	\$ 1.224.726	\$ 590.952	\$ 714.384	\$ 1.096.797		
	\$		2.402.118	\$		2.530.038	\$		2.402.121	\$		2.530.044	\$		2.402.124	\$		2.530.056	\$		2.402.133		

Fuente: Elaboración propia, según anexo 12 y 13.

Anexo 6. Costo del plan de mantención tractocamión convencional.

[illegible]

Fuente: Elaboración propia, según anexo 12 y 13.

Anexo 7. Costo del plan de mantención tractocamión combustión Dual.

VALOR HH CONCESIONARIO	45000																				
	AÑO 1			AÑO 2			AÑO 3			AÑO 4			AÑO 5			AÑO 6			AÑO 7		
Kilómetros	40000	80000	120000	160000	200000	240000	280000	320000	360000	400000	440000	480000	520000	560000	600000	640000	680000	720000	760000	800000	840000
Mano de obra	1	1	1,5	1	1	1,5	1	1	1,5	1	1	1,5	1	1	1,5	1	1	1,5	1	1	1,5
	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500	\$ 45.000	\$ 45.000	\$ 67.500
Repuestos																					
Filtro Hidrogeno	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154	\$ 57.154
Lubricantes																					
Aceite de dirección	-	\$ 30.600	-	\$ 30.601	-	\$ 30.602	-	\$ 30.603	-	\$ 30.604	-	\$ 30.605	-	\$ 30.606	-	\$ 30.607	-	\$ 30.608	-	\$ 30.609	-
Refrigerante EV (15l)			\$ 974.931			\$ 974.931			\$ 974.931			\$ 974.931			\$ 974.931			\$ 974.931			\$ 974.931
TOTAL	\$ 102.154	\$ 132.754	\$1.099.585	\$ 132.755	\$ 102.154	\$1.130.187	\$ 102.154	\$ 132.757	\$1.099.585	\$ 132.758	\$ 102.154	\$1.130.190	\$ 102.154	\$ 132.760	\$1.099.585	\$ 132.761	\$ 102.154	\$1.130.193	\$ 102.154	\$ 132.763	\$1.099.585
	\$ 1.334.492			\$ 1.365.095			\$ 1.334.495			\$ 1.365.101			\$ 1.334.498			\$ 1.365.107			\$ 1.334.501		

Fuente: Elaboración propia, según anexo 14.

Anexo 8. Costo del plan de mantención tractocamión FCEV.

	0	1	2	3	4	5	6	7				
Año	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037			Idicadores económicos	
Ingresos x vtas		\$ 110.000	\$ 115.500	\$ 121.275	\$ 127.339	\$ 133.706	\$ 140.391	\$ 147.411			TMAR	12%
Costo fijo		\$ -348	\$ -355	\$ -362	\$ -369	\$ -377	\$ -384	\$ -392			VAN	\$48.927,11
Costo variable		\$ -66.548	\$ -68.039	\$ -69.210	\$ -70.707	\$ -71.872	\$ -73.375	\$ -74.534			TIR	19%
Utilidad bruta		\$ 43.104	\$ 47.106	\$ 51.703	\$ 56.262	\$ 61.457	\$ 66.631	\$ 72.485			Payback	4 años y 2 meses
Costo de operación		\$ -2.082	\$ -2.124	\$ -2.166	\$ -2.210	\$ -2.254	\$ -2.299	\$ -2.345			TCO	\$ 687.353
Utilidad operacional		\$ 41.022	\$ 44.982	\$ 49.536	\$ 54.053	\$ 59.203	\$ 64.332	\$ 70.140				
Depreciación		\$ -25.000	\$ -25.000	\$ -25.000	\$ -25.000	\$ -25.000	\$ -25.000	\$ -25.000				
Dif x vta de activos a VL								\$ 54.250				
Pérdidas ejercicio anterior												
valor libro												
Utilidad antes de impuesto		\$ 16.022	\$ 19.982	\$ 24.536	\$ 29.053	\$ 34.203	\$ 39.332	\$ 99.390				
Impuesto (27%)		\$ -4.326	\$ -5.395	\$ -6.625	\$ -7.844	\$ -9.235	\$ -10.620	\$ -26.835				
Utilidad despues de impuesto		\$ 11.696	\$ 14.587	\$ 17.912	\$ 21.208	\$ 24.968	\$ 28.713	\$ 72.554				
Pérdidas ejercicio anterior			\$ -	\$ -	\$ -							
Inversión	\$ -175.000											
Depreciación		\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 25.000				
Vta activos a VL												
Flujo neto de Caja	\$ -175.000	\$ 36.696	\$ 39.587	\$ 42.912	\$ 46.208	\$ 49.968	\$ 53.713	\$ 97.554				
Flujo neto de caja acumulado	\$ -175.000	\$ -138.304	\$ -98.717	\$ -55.806	\$ -9.597	\$ 40.371	\$ 94.084	\$ 191.638				

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9. Flujo de caja tractocamión convencional.

Año	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037			Idicadores económicos	
Ingresos x vtas		\$ 110.000	\$ 115.500	\$ 121.275	\$ 127.339	\$ 133.706	\$ 140.391	\$ 147.411			TMAR	12%
Costo fijo		\$ -353	\$ -360	\$ -367	\$ -374	\$ -382	\$ -390	\$ -397			VAN	\$100.202,58
Costo variable		\$ -64.519	\$ -65.969	\$ -67.100	\$ -68.556	\$ -69.681	\$ -71.143	\$ -72.261			TIR	34%
Utilidad bruta		\$ 45.128	\$ 49.171	\$ 53.808	\$ 58.408	\$ 63.643	\$ 68.858	\$ 74.752			Payback	2 Años y 11 meses
Costo de operación		\$ -2.082	\$ -2.124	\$ -2.166	\$ -2.210	\$ -2.254	\$ -2.299	\$ -2.345			TCO	\$ 607.196
Utilidad operacional		\$ 43.046	\$ 47.047	\$ 51.642	\$ 56.198	\$ 61.389	\$ 66.559	\$ 72.407				
Depresiación		\$ -14.250	\$ -14.250	\$ -14.250	\$ -14.250	\$ -14.250	\$ -14.250	\$ -14.250				
Dif x vta de activos a VL								\$ 30.923				
Pérdidas ejercicio anterior												
valor libro											Inversion	
Utilidad antes de impuesto		\$ 28.796	\$ 32.797	\$ 37.392	\$ 41.948	\$ 47.139	\$ 52.309	\$ 89.079			Vehiculo	\$ 99.750
Impuesto (27%)		\$ -7.775	\$ -8.855	\$ -10.096	\$ -11.326	\$ -12.728	\$ -14.123	\$ -24.051			Estanque	\$ 10.000
Utilidad despues de impuesto	\$ -	\$ 21.021	\$ 23.942	\$ 27.296	\$ 30.622	\$ 34.412	\$ 38.186	\$ 65.028			kit de reacondicionaiento	\$ 43
Pérdidas ejercicio anterior											Filtro	\$ 70
Inversión	\$ -109.863										Total	\$ 109.863
Depresiación		\$ 14.250	\$ 14.250	\$ 14.250	\$ 14.250	\$ 14.250	\$ 14.250	\$ 14.250				
Vta activos a VL												
Flujo neto de Caja	\$ -109.863	\$ 35.271	\$ 38.192	\$ 41.546	\$ 44.872	\$ 48.662	\$ 52.436	\$ 79.278				
Flujo neto de caja acumulado	\$ -109.863	\$ -74.592	\$ -36.401	\$ 5.145	\$ 50.018	\$ 98.680	\$ 151.115	\$ 230.393				

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Flujo de caja tractocamión combustión Dual.

Año	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ingresos x vtas		\$ 110.000	\$ 115.500	\$ 121.275	\$ 127.339	\$ 133.706	\$ 140.391	\$ 147.411
Costo fijo		\$ -353	\$ -360	\$ -367	\$ -374	\$ -382	\$ -390	\$ -397
Costo variable		\$ -61.196	\$ -62.459	\$ -63.644	\$ -64.908	\$ -66.092	\$ -67.357	\$ -68.540
Utilidad bruta		\$ 48.451	\$ 52.681	\$ 57.264	\$ 62.056	\$ 67.232	\$ 72.644	\$ 78.473
Costo de operación		\$ -2.082	\$ -2.124	\$ -2.166	\$ -2.210	\$ -2.254	\$ -2.299	\$ -2.345
Utilidad operacional		\$ 46.369	\$ 50.558	\$ 55.097	\$ 59.847	\$ 64.978	\$ 70.345	\$ 76.128
Depreciación		\$ -36.857	\$ -36.857	\$ -36.857	\$ -36.857	\$ -36.857	\$ -36.857	\$ -36.857
Dif x vta de activos a VL								\$ 79.980
Pérdidas ejercicio anterior								
valor libro								
Utilidad antes de impuesto		\$ 9.511	\$ 13.701	\$ 18.240	\$ 22.990	\$ 28.121	\$ 33.488	\$ 119.251
Impuesto (27%)		\$ -2.568	\$ -3.699	\$ -4.925	\$ -6.207	\$ -7.593	\$ -9.042	\$ -32.198
Utilidad despues de impuesto	\$ -	\$ 6.943	\$ 10.001	\$ 13.315	\$ 16.782	\$ 20.528	\$ 24.446	\$ 87.053
Pérdidas ejercicio anterior								
Inversión	\$ -258.000							
Depreciación		\$ 36.857	\$ 36.857	\$ 36.857	\$ 36.857	\$ 36.857	\$ 36.857	\$ 36.857
Vta activos a VL								
Flujo neto de Caja	\$ -258.000	\$ 43.800	\$ 46.859	\$ 50.172	\$ 53.640	\$ 57.385	\$ 61.303	\$ 123.910
Flujo neto de caja acumulado	\$ -258.000	\$ -214.200	\$ -167.341	\$ -117.168	\$ -63.529	\$ -6.144	\$ 55.160	\$ 179.070

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Flujo de caja tractocamión FCEV.

		COSTO DE MANTENCION AUMAN; 1944, 2544, 2546						
Kilómetros	60.000	120.000	180.000	240.000	300.000	360.000	TOTALES	
Horas	600	1.200	1.800	2.400	3.000	3.600	3.600	
MANO OBRA M/T	4,8	5,8	4,8	5,8	4,8	5,8	32	
REPUESTOS Valor H/H	\$216.000	\$261.000	\$216.000	\$261.000	\$216.000	\$261.000	\$1.431.000	
FILTRO AIRE	\$63.436	\$63.436	\$63.436	\$63.436	\$63.436	\$63.436	\$380.616	
FILTRO COMBUSTIBLE	\$24.923	\$24.923	\$24.923	\$24.923	\$24.923	\$24.923	\$149.538	
FILTRO COMBUSTIBLE CON DECANTADO	\$28.188	\$28.188	\$28.188	\$28.188	\$28.188	\$28.188	\$169.128	
FILTRO ACEITE	\$65.703	\$65.703	\$65.703	\$65.703	\$65.703	\$65.703	\$394.218	
SECADOR DE AIRE	\$18.617	\$18.617	\$18.617	\$18.617	\$18.617	\$18.617	\$111.702	
FILTRO DE POLEN O CABINA	\$17.341	\$17.341	\$17.341	\$17.341	\$17.341	\$17.341	\$104.046	
FILTRO BOMBA DE ADBLUE	\$27.640	\$27.640	\$27.640	\$27.640	\$27.640	\$27.640	\$165.840	
LUBRICANTES								
ACEITE MOTOR	\$131.439	\$131.439	\$131.439	\$131.439	\$131.439	\$131.439	\$788.634	
ACEITE TRANS .Automatizada (120.000 kms)		\$188.150		\$188.150		\$188.150	\$564.449	
ACEITE DIFERENCIAL. (x1 diferencial)		\$59.595		\$59.595		\$59.595	\$178.785	
ACEITE DIRECCION HID.		\$30.600		\$30.600		\$30.600	\$91.800	
ANTICONGELANTE		\$117.884		\$117.884		\$117.884	\$353.652	
TOTAL M / T	\$593.287	\$1.034.516	\$593.287	\$1.034.516	\$593.287	\$1.034.516	\$4.883.408	\$ 17

VALORES NO INCLUYEN IVA

- NOTA:
- 1.- El valor de las mantenciones es un referencial aproximado y están sujetos a modificaciones de acuerdo a las variaciones de los precios del listado de repuestos de Andes Motor
 - 2.- El valor de 1 hora de mano de obra es de responsabilidad del Concesionario, eso si se debe regir por el tiempo especificado para cada mantención
 - 3.- En el costo de las mantenciones, no está considerado el ítem frenos, engrase de chasis y mazas de rueda, el cual depende del uso del vehículo
Se recomienda su revisión según kilometraje indicado

Fuente: Sucursal Fronza Placilla.

Anexo 12. Costos mantención tractocamión FOTON.

Vehículo	CAMION
Marca	MAN
Modelo	TGS 28.400 V
Medida para Intervalo	Horas
Tipo de uso	Faenero
Km Mes	10.000
Km Año	120.000

UF	\$ 28.683,17
Dólar	\$ 788,22
AP	4
Teléfono	NO

Factor UF	Factor Dólar
UF/Km. (50%)	US\$/Km. (50%)

Costo Mensual \$/Km.	Costo Mensual \$/Mes.
----------------------	-----------------------

La formule final sera el resultado del producto del factor dólar por el dólar observado mas el producto del factor UF por el valor de la UF multiplicado por el total del kilometros recorridos arroja el total a facturar por unidades mas IVA.

Nota:
Los valores del dólar y de la UF a considerar, para la facturación, serán los observados el día de la facturación.

PORSCHE
CHILE



CODIGO	DESCRIPCION	MANTENCIONES EN HORAS								
		MC1	MC2	MC3+OT	MC1	MC2	MC3+OD	MC1	MC2	MC3+OT
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500
51055040122	FILTRO ACEITE	1	1	1	1	1	1	1	1	1
06586310110	GOLILLA TAPON ACEITE	1	1	1	1	1	1	1	1	1
51125030061	FILTRO KSC (COMBUSTIBLE)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
81125016101	FILTRO RACOR	1	1	1	1	1	1	1	1	1
81084050021	FILTRO AIRE PRIMARIO	1	1	1	1	1	1	1	1	1
81084050017	FILTRO AIRE SEGUNDARIO		1		1		1		1	
E9541C	FILTRO CALEFACCION		1		1		1		1	
81521550042	FILTRO SECADOR			1			1			1
51039050177	EMPAQUETADURA TAPA VALVULAS			1			1			1
51968200345	CORREA			1			1			1
81154030000	FILTRO UREA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E101UD324	FILTRO UREA		1		1		1		1	
TTL110800/11J	ACEITE 10W40 (RUBIA TIR 8900)	42	42	42	42	42	42	42	42	42
TTL112022/11J	ACEITE 75W90 (TRANSMISSION SYN FE)						14,5			
TTL164856/11J	ACEITE 75W80 Z5 (TRANSMISSION XS FE)									12
TTL199154/11J	REFRIGERANTE						50			
MO	MO	2,9	3,5	5,3	3,5	2,9	7,4	2,9	3,5	5,8
	INSUMOS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LAVADO	LAVADO	1	1	1	1	1	1	1		1
	TOTAL (sin IVA)	\$ 464.663	\$ 603.626	\$ 735.338	\$ 603.626	\$ 464.663	\$ 1.170.976	\$ 464.663	\$ 580.406	\$ 815.678

Fuente: Sucursal Zetrum Placilla.

Anexo 13. Costos mantención tractocamión MAN.

		COSTO DE MANTENCION KONA ELECTRICO (OS EV FL) 39,2 Y 64 kWh												
Kilometros X 1.000				10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Meses				12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	TOTALES
MANO OBRA				\$ 41.055	\$ 61.583	\$ 106.743	\$ 61.583	\$ 41.055	\$ 131.376	\$ 41.055	\$ 61.583	\$ 106.743	\$ 61.583	\$ 714.357

REPUESTOS	N° repuesto	Valor	Cant.											
MATERIALES				\$ 10.710	\$ 21.420	\$ 10.710	\$ 21.420	\$ 10.710	\$ 21.420	\$ 10.710	\$ 21.420	\$ 10.710	\$ 21.420	\$ 160.650
LUBRICANTES														
LIQUIDO DE FRENO DOT 4	100051C	\$15.814	1			\$ 15.814			\$ 15.814			\$ 15.814		\$ 47.441
REFRIGERANTE EV	07100J2B20	\$129.991	5						\$ 649.954					\$ 649.954
TOTAL				\$ 52.000	\$ 83.000	\$ 133.000	\$ 83.000	\$ 52.000	\$ 819.000	\$ 52.000	\$ 83.000	\$ 133.000	\$ 83.000	\$ 1.573.000

Fuente: Gildemeister.

Anexo 14. Costos mantención vehículo EV.



SERVICIO DE MANTENIMIENTO "SM3" NEW ACTROS WDB 963.4 / 964.4

Cliente: _____

Kilometraje: _____ Patente: _____

Orden de trabajo: _____ Fecha: _____



- IMPORTANTE:**
- Esta lista de chequeos contiene todas las operaciones requeridas para efectuar el servicio de mantenimiento "SM3".
 - Reparaciones adicionales deben ser "facturadas por separado".
 - Utilizar referencias WIS para consultar detalle de los trabajos a realizar.
 - Los trabajos realizados deben ser tickados en el "cuadro de chequeo A".
 - En caso de detectar fallas, tickar el "cuadro de chequeo B". Realizar una breve descripción del problema.

A	STAR DIAGNOSIS	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS
☐	Conectar y desconectar el equipo Star Diagnosis, realizar una comprobación breve e imprimir datos y borrar memoria de averías.	☐	_____	
☐	En Vehículos Euro VI, revisar el nivel de saturación de filtro DPF y estado del DOC y SCR mediante StarDiagnosis. De ser necesaria una limpieza, informar a cliente y una vez aprobado, facturar por separado.	☐	_____	
A	SERVICIO DE FLUIDOS	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS
☐	Motor: cambio de aceite (Motor 470 - 471 - 473)	☐	_____	AP18.00-W-0101H
☐	Motor: cambio de aceite (Motor 936)	☐	_____	AP18.00-W-0101MD
☐	*Reemplazar Filtro de aceite de motor (Motor 470 - 471 - 473)	☐	_____	AP18.00-W-0101H
☐	*Reemplazar Filtro de aceite de motor (Motor 936)	☐	_____	AP18.00-W-0101MD
☐	Cambio de aceite en caja de cambio ☐ Vehículos fabricados desde el 01-09-17 con código SA 07A, pueden utilizar la caja 235.11 o 235.16. Atención: Págs 235.11 y 235.16: No se deben mezclar. Antes de realizar trabajos, ir y leer nota (2) en pasta "Lubricación"	☐	_____	AP26.00-W-2601H
☐	Cambio de aceite del eje trasero (Incluye grupo reductor si aplica)	☐	_____	AP26.00-W-3901H
☐	Cáster del árbol de paso al segundo eje trasero - cambio de aceite EJE TRASERO 748.281/283/291/293/295	☐	_____	AP26.00-W-3902H
☐	Turbocompresor retardador: cambio de aceite	☐	_____	AP26.50-W-2901H
☐	Caja de transferencia: cambio de aceite (Según corresponda)	☐	_____	AP26.60-W-2801H
☐	Árbol de paso eje delantero: Cambio de aceite, si aplica	☐	_____	AP33.00-W-3303H
☐	Eje delantero: Cambio de aceite, si aplica	☐	_____	AP33.00-W-3301H
☐	Retardador: cambio de aceite con filtro (Con código B3K (Retardador de aceite secundario) o con código J33K (Retardador de aceite secundario))	☐	_____	AP43.30-W-4301HV
A	COMPROBAR EL NIVEL Y REESTABLECER SI ES NECESARIO	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS
☐	Controlar niveles de componentes no afectos en el mantenimiento que se está realizando, como por ejemplo: Transmisión, Diferencial, Cubos, Masas, Dirección, Refrigerante, Etc.	☐	_____	AP20.00-W-2010H
☐	Examinar si el líquido refrigerante está sucio. Con código B3H (Retardador secundario por agua) y excepto código MBT (Filtro de líquido refrigerante). Si el líquido refrigerante tiene color alterado, sustituir el líquido refrigerante. ☐ (Observar la composición del líquido refrigerante) NOTA: El cambio del líquido refrigerante para unidades con código B3H (Retardador secundario por agua), se deberá realizar en SM2 SM3 y SM4 o cada 2 años, lo primero que ocurra.	☐°C (Registrar concentración) DATP 43 13 2021 - Procedimiento y diagnóstico del refrigerante en vehículos con Aguatarde	☐ _____ ☐ _____	AP20.00-W-1100H AP20.00-W-2080H
A	SERVICIO DE LUBRICACIÓN	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS
☐	Manguetas, articulaciones de cruzeta del árbol de transmisión, enganche para remolque, sistema de volqueto, ejes de freno.	☐	_____	AP00.20-W-0020H

SERVICIO DE MANTENIMIENTO "SM3" NEW ACTROS WDB 963,4 / 964,4

A	SISTEMA SCR	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS																				
☐	Revisar depósito de AdBlue respecto a contaminación.	☐																						
A	COMPROBAR VISUALMENTE ESTANQUEIDAD Y ESTADO	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS																				
			Prestar atención a todos los puntos de roce y al sentido de las conducciones.																					
☐	Motor, cable, retardador, ejes, dirección, bomba de la servodirección, sistema de inclinación de la cabina; comprobar estanqueidad y estado.	☐		AP05.20-W-0050H																				
☐	Comprobar la estanqueidad y el estado de la tubería de admisión de aire entre el filtro de aire y el motor.	☐		AP09.00-W-0053H																				
☐	Sistema de refrigeración y calefacción: comprobar el estado y la estanqueidad del radiador, tuberías y tubos flexibles.	☐		AP05.00-W-2050H																				
☐	Comprobar la estanqueidad y el estado del sistema de escape.	☐		AP49.00-W-4850H																				
☐	Todos los depósitos, aparatos, amortiguadores, cubiertas, guarniciones, caperuzas protectoras - comprobar la estanqueidad y el estado.	☐		AP00.20-W-0052H																				
A	MOTOR	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS																				
☐	Comprobar correa de nervios trapezoidales está desgastada.	☐		AP13.22-W-1351H																				
☐	Comprobar y ajustar el juego de válvulas del motor y el freno motor MOTOR 470-471-473 / 896 Según intervalo cronograma.	☐		AP05.30-W-0560MO AP05.30-W-0560H																				
☐	Renovar el filtro de combustible (Principal) y filtro fino de combustible (filtro tanto en módulo de filtro de combustible)	☐		AP47.20-W-0780H																				
☐	Reemplazar el prefiltro de combustible (Filtro en Tanque de combustible)	☐		AP47.20-W-0781H																				
☐	Prefiltro de combustible con separador de agua: sustituir el elemento filtrante	☐		AP47.20-W-0783H																				
☐	*Cambiar el elemento del filtro de aire	☐		AP05.10-W-0080HA																				
☐	Reemplazar el filtro de polvo de la calefacción/ventilación	☐		AP83.00-W-8381H																				
☐	Renovar el filtro en la tubería de ventilación del depósito de combustible	☐		AP47.20-W-0795A																				
☐	Secador de aire comprimido: cambiar los cartuchos de granulado	☐		AP42.60-W-4381H																				
☐	Turboencargador retardador: cambio de filtro	☐		AP25.50-W-2501H																				
☐	Renovar el filtro de AdBlue®	☐		AP14.40-W-1401H																				
A	CHASIS Y CARROCERÍA	B	COMENTARIOS	REFERENCIA WIS																				
☐	Comprobar todos los cables y tubos flexibles, cables de sensor, respecto a puntos de desgaste por rozamiento y al sentido.	☐		AP00.20-W-0051H																				
☐	Corregir la presión de inflado de los neumáticos, incluida la rueda de repuesto.	☐		AP40.15-W-4080H																				
☐	Comprobar el entorque de los frenos.	☐		AP82.10-W-8250H																				
☐	Enganche para remolque: comprobar el funcionamiento, juego y fijación.	☐		AP31.50-W-3151H																				
☐	Quinta rueda: examinar el funcionamiento, juego y fijación.	☐		AP31.10-W-3150H																				
☐	Control visual de daños balastos/bufetes neumáticos.	☐		AP32.20-W-3250H																				
☐	Leer en el visualizador el desgaste de los frenos de freno.	☐		AP42.00-W-4293H																				
			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Recorrido restante en km</th> <th colspan="2">Tiempo de servicio restante</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1º Eje Delantero</td> <td></td> <td>1º Eje Delantero</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2º Eje Delantero</td> <td></td> <td>2º Eje Delantero</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1º Eje Trasero</td> <td></td> <td>1º Eje Trasero</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2º Eje Trasero</td> <td></td> <td>2º Eje Trasero</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido restante en km		Tiempo de servicio restante		1º Eje Delantero		1º Eje Delantero		2º Eje Delantero		2º Eje Delantero		1º Eje Trasero		1º Eje Trasero		2º Eje Trasero		2º Eje Trasero	
Recorrido restante en km		Tiempo de servicio restante																						
1º Eje Delantero		1º Eje Delantero																						
2º Eje Delantero		2º Eje Delantero																						
1º Eje Trasero		1º Eje Trasero																						
2º Eje Trasero		2º Eje Trasero																						
☐	Examinar el estado del sistema mecánico de la dirección.	☐		AP45.00-W-4550H																				
☐	Revisar apriete pernos de rueda según tabla de procedimiento	☐		SA40.10-N-1000-03E																				
☐	Respetar los tornillos y las tuercas (Abrazaderas de estanques combustibles)	☐		AP00.20-W-0073H																				
☐	Control visual de bujes de brazos Tensores suspensión eje trasero	☐																						

KAUFMANN









SERVICIO DE MANTENIMIENTO "SM3" NEW ACTROS WDB 963.4 / 964.4

A

CONTROL DE FUNCIONAMIENTO

R

COMENTARIOS

REFERENCIA WIS

☐

Controlar el funcionamiento de la bocina, sistema de señales y testigos de control en el tablero de instrumentos.

☐

AP54 80-W-5451H

☐

Comprobar el funcionamiento y el ajuste del limpiaparabrisas, el sistema lavaparabrisas y el sistema lavafaros.

☐

AP52 30-W-8252H

A

TRABAJOS FINALES

R

COMENTARIOS

REFERENCIA WIS

☐

Control final, realizar prueba de ruta y verificar el correcto funcionamiento de frenos de servicio y estacionamiento, dirección, iluminación, testigos de control y rendimiento general.

☐

☐

Elaborar los datos de servicio en la pantalla

☐

☐

Lavado.

☐

Técnico:

Supervisor:

Firma:

Firma:

Sucursal:

Servicio de mantenimiento Mercedes-Benz NEW ACTROS WDB 963.4 / 964.4. Elaborado por Comercial Kaufmann S.A. Proveniente en base a manuales de mantenimiento incluidos por el fabricante. El uso de esta planta NO garantiza la durabilidad de los componentes del vehículo y debe ser aplicada por personal calificado. Todos los derechos reservados, Mercedes-Benz es una marca del grupo Daimler. Comercial Kaufmann S.A. Se reserva el derecho de hacer cambios sin previo aviso.

Versión 2.1, a partir de Octubre 2022

Servicio SM3

1

Fuente: Sucursal KAUFMANN Placilla.

Anexo 15. Servicio de mantenimiento KAUFMANN.

Lista de comprobación de mantenimiento ProFit-Check III
TGL, TGM, TGS, TGX
(sin cabeza tractora para transportes pesados)



Inspección III, en función del uso

Válido solo en combinación con la hoja de aceptación.

Número de orden de trabajo:

Para los siguientes vehículos/usos se recomienda, según cada necesidad, los paquetes adicionales mencionados más abajo:

Vehículo de recogida de basuras (cargador trasero/lateral, residuos reciclables, cargador frontal/bifrontal), gestión de residuos (contenedor de vidrio, contenedor de papel, volquete de deposición/descarga por rodadura) barredoras, limpieza de canales, soportes de herramientas, plataformas de trabajo, servicio de carreteras e invierno, vehículo para la minería.

La determinación de los intervalos para el paquete adicional y su recopilación se basa en la consideración de los talleres de servicio o la región correspondientes.

Paquete 1

	Realizado/ Correcto	No es correcto	Eliminado
	X	X	X
→ Comprobar el aislamiento térmico en la parte inferior del vehículo, los turbocompresores, diversas conducciones y los colectores de escape.			
→ Limpiar el prefiltro/filtro del tambor perforado del centro de servicio de combustible.			
→ Comprobar el elemento del filtro de combustible en el centro de servicio de combustible.			
→ Sustituir el elemento del filtro de combustible del filtro previo de combustible.			
→ Comprobar la correa trapezoidal con dentado interior, el rodillo tensor y la polea inversora.			
→ Motor de arranque, alternador, punto de masa: Comprobar las conexiones, fijaciones y el tendido de los cables.			
→ Comprobar el filtro de interior/filtro de polen.			
→ Comprobar la suciedad de las aletas del radiador de alta y baja temperatura y el condensador de refrigerante.			
→ Comprobar el funcionamiento de la válvula de evacuación de polvo del filtro de aire seco.			

Paquete 2

→ Comprobar el nivel del líquido del motor, las cajas de cambios, los ejes, la caja de transferencia y la dirección.			
--	--	--	--

Paquete 3

→ Comprobar el asiento fijo y la seguridad de los tornillos prisioneros de la barra de acoplamiento/biela y la tuerca de la palanca en la columna de dirección.			
→ Comprobar los fuelles de hermetización y el juego axial en las articulaciones esféricas de la barra de acoplamiento/biela.			
→ Comprobar el estado de los neumáticos, comprobar la existencia de extensiones de válvula.			
→ Comprobar el asiento fijo de las tuercas de rueda (tener en cuenta el par de apriete).			
→ Comprobar el asiento fijo y la seguridad del soporte/la fijación de la rueda de repuesto.			
→ Lubricar el bulón de mangueta, cuando esté disponible.			

Paquete 4

→ Comprobar la barra estabilizadora.			
→ Comprobar el brazo longitudinal, triangular y cuadrangular.			
→ Comprobar el amortiguador.			
→ Comprobar los alojamientos intermedios de goma y de la suspensión por ballestas.			
→ Comprobar las grietas de los fuelles arrollables neumáticos del sistema de suspensión neumática.			

Paquete 5

→ Comprobar el desgaste de las pastillas de freno del freno de tambor en la minilla.			
→ Lubricar el árbol de levas del freno y los reguladores del vanillojo en el freno de tambor.			
→ Comprobación el asiento fijo y el estado del árbol de transmisión.			

Lista de comprobación de mantenimiento ProFit-Check III
TGL, TGM, TGS, TGX
 (sin cabeza tractora para transportes pesados)
Inspección III, en función del uso



	Realizado/ Correcto	No es correcto	Eliminado
Pequete 6	X	X	X
→ Lubricar los puntos de apoyo de los puentes de abastecimiento.			
→ Lubricar la rosca de pivote y el alojamiento de los rodillos de centrado con el basidor portante de la carrocería intercambiable.			
→ Lubricar el árbol de transmisión de la bomba tándem del sistema hidráulico central.			
→ Comprobar el asiento fijo y el bloqueo del gancho de remolque/quinta rueda.			
→ Lubricar el gancho de remolque/quinta rueda (se suprime con la lubricación centralizada).			
→ Comprobar el desgaste del gancho de remolque/quinta rueda.			

Fecha, firmas	
Asesor de servicio	Empresa contratista

Fuente: Sucursal Zetrum Placilla.

Anexo 16. Servicio de mantención MAN.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. U. c. global, «Centro UC cambio global,» [En línea]. Available: <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/gas-de-efecto-invernadero-gei>.
- [2] Bonn., «Climate Change Perfomance,» Alemania, Germanwatch, 2023.
- [3] M. d. m. ambiente, «snichile.mma.gob.cl,» [En línea]. Available: <https://snichile.mma.gob.cl/sector-energía/>.
- [4] STATISTA, «Participación del sector minero en el producto interno bruto (PIB) en Chile de 2010 a 2021,» 13 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1284650/participacion-del-pib-de-la-industria-minera-en-chile/>.
- [5] M. d. energía, «Estrategia nacional de hidrógeno verde y líneas de acción,» 12 marzo 2023. [En línea]. Available: https://energía.gob.cl/sites/default/files/1_-_estrategia_-_camilo_aviles_min_energía.pdf.
- [6] G. d. Chile, «Estrategia nacional de hidrógeno verde,» 28 marzo 2023. [En línea]. Available: https://energía.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrógeno_verde_-_chile.pdf.
- [7] M. d. energía, «Noticia, Ministerio de energía,» 15 octubre 2021. [En línea]. Available: <https://energía.gob.cl/noticias/nacional/lanzamiento-estrategia-nacional-de-electromovilidad-gobierno-anuncia-que-al-2035-se-venderan-solo-vehiculos-electricos-en-chile>.
- [8] P. d. electromovilidad, «Tipos de vehículos eléctricos BEV, PHEV, FCEV,» 13 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://energía.gob.cl/electromovilidad/infografias>.
- [9] J. d. D. R. R. C. Patricio Lillo, «Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH,» 25 mayo 2020. [En línea]. Available: https://energía.gob.cl/sites/default/files/proposicion_de_estrategia_regulatoria_del_hidrógeno_para_chile.pdf.
- [10] R. J. d. D. C. R. Lillo Patricio, «Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH,» 25 mayo 2020. [En línea]. Available: https://energía.gob.cl/sites/default/files/proposicion_de_estrategia_regulatoria_del_hidrógeno_para_chile.pdf.
- [11] M. Navas, «Diario financiero,» 19 agosto 2022. [En línea]. Available: <https://dfmás.df.cl/df-más/por-dentro/el-millonario-proyecto-de-hidrógeno-verde-que-enfrenta-a-corfo-con>.
- [12] P. Toyota, «Prensa Toyota,» 12 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://prensa.toyota.es/el-prototipo-corolla-cross-hydrogen-concept-subraya-la-estrategia-multiple-de-toyota-hacia-las-emisiones-cero/>.
- [13] P. Movilidad, «PORTAL Movilidad,» 15 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=SqFoxtlYFn0>.
- [14] H. e. l. electromovilidad, «PLATAFORMA de electromovilidad,» 15 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://energía.gob.cl/electromovilidad/infografias>.

- [15] T. &. evironment, «Transport & evironment,» diciembre 2020. [En línea]. Available: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2020/12/2020_12_Briefing_feasibility_study_renewables_decarbonisation.pdf.
- [16] Transporte, «Ministerio de medio ambiente,» 27 febrero 2023. [En línea]. Available: <https://snichile.mma.gob.cl/sector-energía/>.
- [17] OLADE, «Manual de balances Energía útil.,» OLADE, Quito, 2017.
- [18] Subsecretaría de Transportes, «Actualización de Modelo de Costos de Transporte de Carga para el Análisis de Costos Logísticos, del Observatorio logístico,» Steer, Santiago, 2020.
- [19] Biblioteca del congreso nacional de Chile, «bcn,» Mayo 2022. [En línea]. Available: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33266/2/Minuta_Desaladoras_en_Chile.pdf.
- [20] A. Gupta, «Hydrogen Storage, Distribution and Cleaning,» KTH Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering, STOCKHOLM, 2017.
- [21] M. Hirscher, Handbook of Hydrogen, Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- [22] Y. Cengel y M. Boles, Termodinámica, Séptima ed., Ciudad de Mexico: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, 2009.
- [23] Implementa Sur, «Estudio para definir esquemas de financiamiento para la acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de Hidrógeno Verde en Chile,» Implementa Sur, Santiago, Chile, 2019.
- [24] Subsecretaría de Transportes, «Actualización de Modelo de Costos de Transporte de Carga para el Análisis de Costos Logísticos, del Observatorio Logístico.,» Steer, Santiago, 2020.
- [25] National Renewable Energy Laboratory, «Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks,» NREL, EEUU, 2021.
- [26] [En línea].
- [27] UNFCCC, «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,» Río de Janeiro, 1992.
- [28] UNFCCC, «Definiciones,» de *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Río de Janeiro, 1992.