UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO - CHILE

EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PARQUE VEHICULAR DE CHILE, PROYECCIONES DE SU VARIACIÓN Y ANÁLISIS DE SU ROL PARA LOGRAR LA CARBONO NEUTRALIDAD EN EL 2050

FERNANDA CAROLINA JAMET OLGUÍN

Memoria para optar al título de

Ingeniera Civil Ambiental

Profesor Guía: Pamela Bonert

Profesor correferente: Daniel Ramírez

Fecha: 11 de enero de 2023

Resumen ejecutivo

Los peligros del cambio climático han forzado que varios países se comprometan a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para convertirse en carbono neutrales. Chile se unió a este compromiso estableciendo como fecha límite el año 2050.

El transporte terrestre es causante de un 22% de las emisiones de GEI de Chile por lo tanto parte de las metas establecidas buscan hacer cambios en este sector como, por ejemplo, integrar la electromovilidad en el parque vehicular. Sin embargo, en el año 2021, la gasolina y el diésel son los combustibles más utilizados con un 73,1% y un 26,7% de participación, respectivamente. Vehículos eléctricos y otros tipos de energía representan solamente un 0,2% del parque vehicular. Se espera que para el año 2050 existan 12,5 millones de vehículos, más del doble de lo existente en el 2021, por lo que identificar su composición en cuanto a energía permite proyectar emisiones y enfocar esfuerzos respecto a medidas e inversiones. Con esto en mente se plantean cuatro escenarios para el 2050, con diferentes porcentajes de electromovilidad, con los cuales se analizan tecnologías, emisiones, dependencia de la matriz eléctrica y se comparan con la huella de carbono del 2021.

Para calcular las huellas de carbono se utilizan los factores de emisión estándar de IPCC 2006 y el consumo anual de energía. Los rendimientos del 2050 consideran el aumento de rendimiento por la normativa. Para el 2021 se obtiene un total de 27.387,57 kilotoneladas de CO_2 equivalente emitidos.

Para el año 2050, se plantean escenarios optimistas y pesimistas de acuerdo con el cumplimiento de las metas planteadas para reducir emisiones (ver Tabla 1). Se obtiene que los escenarios 1 y 2 permitirían una disminución significativa (mayor al 40%) siendo el Escenario 1 el más eficaz, demostrando así los buenos resultados que se obtienen al incrementar los vehículos eléctricos y en disminuir el consumo de combustibles fósiles. Los subescenarios con porcentajes de electromovilidad igual a la de escenarios optimistas, pero con un 40% de VLM híbridos, logran reducciones menores que su respectivo

escenario original, sin embargo, muestran que tener una alta electromovilidad con ayuda de híbridos es preferible a tener menos vehículos eléctricos, aunque éstos sean a batería.

Tabla 1. Resumen de resultados

Escenario	Porcentaje de electromovilidad (%)				Variación de emisiones vs. 2021 (%)
	VLM	Colectivos	Buses	Camiones	
1	58	100	100	71	-61,26
2	40	100	100	71	-48,69
3	21	21	35	10	13,96
4	0,09	0	0,83	0,01	46,08

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que los resultados de la Tabla 1 consideran el logro de una matriz eléctrica con cero emisiones. Si esta meta no es alcanzada, los escenarios con mayor electromovilidad se ven altamente afectados debido a su mayor dependencia en la matriz.

En cuanto al uso de camiones a hidrógeno, se concluye que consumen grandes cantidades de electricidad para su funcionamiento debido principalmente por su baja eficiencia lo que lo pone en desventaja ante vehículos totalmente eléctricos. Sin embargo, se les reconoce beneficios al momento de su uso, como no emitir GEI y su corto tiempo de repostaje.

En el caso del uso de GLP en vehículos colectivos, este reduce levemente las emisiones de este transporte cuando reemplaza el diésel o gasolina (2,98% y 1,87% respectivamente). Sin embargo, esta disminución no produce cambios significativos en la totalidad del escenario, por lo que el GLP no es una herramienta útil para alcanzar la carbono neutralidad.

Finalmente, es importante que para alcanzar las metas de electromovilidad se impulsen los vehículos eléctricos mediante incentivos económicos como disminución de impuestos y/o bajos precios de compra, lo que ha tenido buenos resultados en países como Noruega y Colombia. Todo esto se debe ver acompañado por un aumento de la accesibilidad a centros de carga a lo largo del país. Alcanzar la meta del año 2035 es esencial para alcanzar un alto

porcentaje de electromovilidad para el 2050, por lo que asegurar un crecimiento de las ventas en los próximos años es crucial.

Índice de abreviaturas

GEI: gases de efecto invernadero

FE: Factor de Emisión

INE: Instituto Nacional de Estadísticas

NDC: *nationally determined contribution* o contribución determinada a nivel nacional

ECLP: Estrategia Climática de Largo Plazo

INGEI: Inventario de Gases de Efecto Invernadero

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change* o Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

GHG: *Greenhouse Gases protocol* o Protocolo de Gases de Efecto Invernadero

SNI: Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero

SEN: Sistema Eléctrico Nacional

SAR: *Second assessment report*

AR4: *Fourth assessment report*

AR5: *Fifth assessment report*

PCG: potencial de calentamiento global

PCS: poder calorífico superior

VLM: vehículos livianos y medianos particulares

GNC: gas natural comprimido

GLP: gas licuado de petróleo

BEV: *battery electric vehicle* o vehículo eléctrico a batería

HEV: *hybrid electric vehicle* o vehículo eléctrico híbrido

Índice

Índice de abreviaturas 5

1. Introducción 10

1.2. Objetivos 11

1.2.1. Objetivo general 11

1.2.2. Objetivos específicos 11

2. Marco teórico 13

2.2. Parque vehicular chileno 13

2.3. Comportamiento y volumen del parque vehicular 13

2.3.1. Distribución según tipos 15

2.4. Motorización del parque vehicular 16

2.5. Uso de vehículos 18

2.5.1. Rendimientos 18

2.5.2. Venta de gasolina 21

2.6. Proyecciones volumen parque vehicular 21

2.7. Tecnologías actuales y emergentes para el control de emisiones 22

2.7.1. Vehículos eléctricos 23

2.7.1.1. Tipos de vehículos eléctricos 23

2.7.1.2. Modos de recarga 25

2.7.1.3. Ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos 26

2.7.1.4. Vehículos eléctricos en el mundo 28

2.7.2. Vehículos a gas 30

2.7.2.1. Tipos de vehículos a gas 30

2.7.2.2. Ventajas y desventajas de vehículos a gas 31

2.7.3. Vehículos con biocombustibles 32

2.7.3.1. Ventajas y desventajas de vehículos a biodiésel 33
2.7.4. Eco combustibles o *e-fuel* 34
2.7.4.1. Ventajas y desventajas de *e-fuels* 34
2.8. Tecnologías para disminuir emisiones del transporte en Chile 35
2.9. Matriz energética 37
2.9.1. Matriz eléctrica 38
2.10. Políticas y proyecciones sobre fuentes de energía 38
2.11. Metas para la carbono neutralidad en Chile 40
2.12. Huella de carbono 41
2.13. Factor de emisión 43
2.13.1. Registro de factores de emisión 43
2.13.2. Factores de emisión transporte terrestre 44
2.13.2.1. Potenciales de calentamiento global 45
2.13.3. Factores de emisión matriz energética chilena 46
2.14. Huella de carbono histórica del transporte terrestre en Chile 46
3. Marco metodológico 48
3.1. Alcance y enfoque 48
3.2. Procedimiento 49
3.3. Categorías de vehículos 49
3.4. Proyecciones 50
3.4.1. Supuestos 50
3.4.2. Escenarios 51
3.4.3. Número total de vehículos 54
3.5. Número de vehículos por categoría 2021 y 2050 55
3.6. Cálculo de emisiones parque vehicular 56

3.6.1. Nomenclatura 56
3.6.2. Huella de carbono 57
3.6.3. Consumo de combustible y electricidad 57
3.6.4. Cálculo emisiones 60
3.6.5. Variación de datos para análisis 60
3.6.6. Datos usados 61
4. Resultados 62
4.1. Resultados 2021 62
4.2. Resultados 2050 65
4.2.1. Escenario 1 66
4.2.2. Escenario 2 70
4.2.3. Escenario 3 72
4.2.4. Escenario 4 73
4.2.5. Superación de metas 75
5. Análisis de resultados 76
5.1. Análisis 2021 76
5.2. Análisis escenarios 2050 77
5.2.1. Uso de vehículos híbridos 79
5.2.2. Variación de matriz eléctrica 81
5.2.3. Camiones a Hidrógeno y Camiones eléctricos 83
5.2.4. Uso de gas licuado de petróleo 86
5.2.5. Éxito y superación de metas 87
6. Conclusión 91
7. Referencias 93
8. Anexos 109

Anexo 1: rendimientos 2021 y cálculo rendimientos 2050 109

Anexo 2: parque vehicular 2050 110

Anexo 3: densidades, poderes caloríficos y conversiones 111

Anexo 4: consumos y emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O de 2021 112

Anexo 5: resultados 2050 116

Anexo 5.1: resultados Escenario 1 117

Anexo 5.1.1.: Escenario 1.1 118

Anexo 5.1.2.: variación híbridos en Escenario 1 120

Anexo 5.1.3.: camiones a hidrógeno 121

Anexo 5.2: resultados Escenario 2 122

Anexo 5.2.1.: Escenario 2.1 124

Anexo 5.3: resultados Escenario 3 126

Anexo 5.4: resultados Escenario 4 128

Anexo 6: variación entre volumen de gasolina vendida y calculada 130

Anexo 7: eficiencia vehículos 132

Anexo 8: venta de autos nuevos y autos usados 133

Anexo 9: variación precio vehículos eléctricos 134

Anexo 10: Promedio ventas anuales VLM en Chile 135

1. Introducción

La temperatura del planeta ha ido en aumento en las últimas décadas con una rapidez sin precedentes, causando impactos negativos en la diversidad y en los climas del mundo. Uno de los principales motivos del calentamiento global son los gases de efecto invernadero o GEI, como el metano y el ozono, los cuales son emitidos a la atmósfera producto de las actividades humanas y son causantes de la alteración del balance de energía del planeta provocando su calentamiento. El principal causante de este fenómeno es el dióxido de carbono, gas de efecto invernadero que contribuye en un 66% a las alzas de temperatura debido a su gran presencia en la atmósfera y su durabilidad (Planelles, 2021).

Para detener o desacelerar este incremento de temperatura y así minimizar los impactos, es que se ha requerido la cooperación internacional para encontrar soluciones conjuntas. De esta forma, en el acuerdo de París del año 2015 se planteó el objetivo de limitar el aumento de temperatura mundial determinando como aumento máximo dos grados Celsius, pero buscando que se pueda limitar a 1,5 grados Celsius en relación con periodos preindustriales (United Nations, 2015). Para lograr la meta, los países que participaron en este acuerdo se proponen disminuir la emisión de los gases de efecto invernadero presentando diferentes estrategias. Uno de los objetivos planteados es lograr la neutralidad de carbono para el año 2050, meta que ya ha sido establecida formalmente por 61 países (Mena Roa, 2021), entre ellos Chile.

Ser carbono neutral consiste en que la emisión de dióxido de carbono debe ser la misma cantidad que puede ser captada por la vegetación. De esta forma, para lograr esta meta se puede aumentar la captación incrementado el área de bosques, por ejemplo, y/o reducir los GEI emitidos. De las emisiones brutas de dióxido de carbono en Chile un 37% es absorbido por el sector forestal dejando 70 millones de toneladas acumuladas en la atmósfera anualmente (Moraga & Alfaro, 2019).

Para reducir las emisiones es importante enforcarse en aquellos sectores que emiten una mayor cantidad de gases de efecto invernadero. En el 2018, el 77,4% de las emisiones de GEI en Chile correspondían al sector de energía, porcentaje que considera la generación de electricidad, el transporte y otros subsectores, seguido por la agricultura con un 10,5%, residuos con un 6,2% y procesos industriales y uso de productos con un 5,9%. El transporte

terrestre emitía cerca del 22% de los GEI del país (Ministerio de Energía, 2022). Debido a su relevancia, muchas de las estrategias medioambientales se han centrado en el sector del transporte y en el uso de energías limpias en este.

A pesar de que en la actualidad el parque vehicular chileno se ve compuesto principalmente por vehículos con combustibles convencionales, nuevas tecnologías con energías renovables, que reducen o neutralizan las emisiones de los vehículos al funcionar, están tomando protagonismo a nivel mundial y paulatinamente entrando en el mercado chileno.

Estudiar la introducción de energías limpias, medir la efectividad de las estrategias presentadas en relación con el transporte terrestre y los objetivos ambientales, y analizar proyecciones comparando con el comportamiento del parque vehicular en Chile, permitirá determinar las mejores condiciones para la reducción de emisiones, los efectos de los distintos posibles escenarios futuros y sugerir acciones para potenciar la disminución de gases de efecto invernadero.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Contrastar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero del actual parque vehicular de Chile con respecto al proyectado al 2050, para analizar el rol del cambio tecnológico vehicular a fin de alcanzar la Carbono Neutralidad del país al 2050.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar el actual parque vehicular chileno.
- Reconocer tecnologías emergentes en la industria automotriz según fuentes de energía y analizar su introducción en el mercado.
- Estimar posibles escenarios del parque vehicular para el año 2050, según usos de energía.
- Identificar los Factores de Emisión relacionados al parque vehicular, escenario actual y futuro.

- Calcular la huella de carbono para el escenario actual y futuro proyectados del parque vehicular.
- Contrastar la huella de carbono para el escenario actual y futuro proyectados del parque vehicular.
- Examinar el rol del escenario futuro proyectado del parque vehicular, respecto a la Carbono Neutralidad para Chile 2050.

2. Marco teórico

2.2. Parque vehicular chileno

El parque vehicular o automotriz consiste en todos aquellos vehículos motorizados y no motorizados que circulan en Chile. Este concepto se refiere principalmente a aquellos vehículos livianos, medianos y pesados, que se utilicen para el transporte colectivo, carga o particular. Incluye motocicletas y vehículos no motorizados.

Los vehículos livianos están definidos en el decreto N°211 artículo 1° como aquellos con un peso bruto de menos 2.700 kilogramos con cuatro o más ruedas y que pueden ser usados para el transporte de pasajero y comercial. El decreto N°54 establece que los vehículos con un peso bruto igual o superior a 2.700 e inferior a 3.860 se denominan vehículos livianos (Servicio de Impuestos Internos, 2021). Finalmente, de acuerdo con el decreto 55, artículo 1° en Chile se define como vehículo pesado a aquel destinado al transporte de personas o carga y que tiene un peso bruto vehicular igual o mayor a 3.860 kilogramos (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2012).

Los tipos de transporte se definen según a su uso. El transporte donde el uso es personal del dueño es llamado particular. El transporte colectivo es aquel donde el vehículo se destina al transporte de pasajeros o equipaje. Por último, cuando el vehículo es construido principalmente para el transporte de mercancías se denomina transporte de carga (INE, 2019).

2.3. Comportamiento y volumen del parque vehicular

Se dice que el primer auto en transitar en Chile lo hizo en abril de 1902 y fue de origen nacional (Nakouzi, 2021). Ocho años más tarde, había veintiún autos inscritos en la municipalidad de Santiago. En los años siguientes, el crecimiento de población, la importación masiva de vehículos y el aumento progresivo en el poder adquisitivo de los chilenos tuvo un impacto positivo en el número de vehículos (Nakouzi, 2021). En el año 2000 se registraron 2,07 millones de vehículos con motor (Gutiérrez M. , 2011). Para el año 2010 esta cifra ascendía a 3,3 millones de unidades, lo que significó un 58,7% de crecimiento en 10 años (Gutiérrez M. , 2011). En gran parte de la siguiente década el crecimiento fue apoyado con el incremento en la oferta y la popularización de nuevos

mercados. Se estima que para fines del 2017 había 5,2 millones de vehículos circulando. Sin embargo, la pandemia provocó incertidumbre, cuarentenas y con ello un decrecimiento en la compra de vehículos en el año 2019-2020. Según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) en el año 2020 las municipalidades de Chile otorgaron 5,5 millones de permisos de circulación, lo que significa un descenso de un 2,2% con respecto al año anterior (Godoy, 2021).

En la Tabla 1 se puede observar el número total de vehículos desde los años 2016 hasta el 2021, indicando además la cantidad que corresponde a motorizados y a no motorizados, mostrando que estos últimos son una pequeña sección del total.

Tabla 2. Parque vehicular chileno 2016-2021

Año	Total	Motorizados	No motorizados
2016	4.960.945	4.853.413	107.532
2017	5.190.704	5.079.718	110.986
2018	5.498.895	5.382.604	116.291
2019	5.718.409	5.599.733	118.676
2020	5.591.145	5.479.286	111.859
2021	6.102.351	5.980.693	121.658

Fuente: permisos de circulación, INE 2021

Las cifras del año 2021 muestran una recuperación en el alza de la tasa de crecimiento producto a una estabilidad dentro de la emergencia sanitaria, la mayor liquidez de las personas gracias a ayudas varias, la reactivación de distintos sectores económicos y a la seguridad ante contagios dada por el transporte particular (ISCI, 2021). Acorde a la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC) en el 2021 hubo un aumento de un 60,6% con respecto al año anterior en las ventas de vehículos livianos y medianos nuevos, comercializándose 415.581 unidades. Esta cantidad lo convierte en el segundo mejor año del sector automotor chileno superado solamente por el 2018. Los camiones tuvieron una gran importancia en el abastecimiento del país motivo por lo cual se puede explicar el aumento de 58,7% en ventas si se compara con los doce meses del 2020. Por su parte, los buses registraron una baja del 28,9% (ANAC, 2021). Con estos registros se espera que la

tasa de motorización, es decir la cantidad de personas por vehículos en el país, haya alcanzado el valor 3,62 siendo una de las mayores en Latinoamérica (González C. , 2022).

De acuerdo con el primer informe de ANAC correspondiente al año 2022, indica que en enero se matricularon 37.281 nuevos vehículos livianos y medianos en Chile lo cual sería la mayor cantidad registrada al inicio de un año. Esta categoría crece un 49,2% con respecto a enero del 2021. Igualmente, los camiones experimentaron un crecimiento de 17,1%. A su vez, los buses volvieron a indicar una caída de 8,3% (ANAC, 2022). Para el resto del año se prevé una desaceleración económica producto al rápido crecimiento experimentado en el año anterior.

2.3.1. Distribución según tipos

Para el año 2021 el parque vehicular motorizado estaba compuesto por un 92,5% por vehículos particulares, un 3,4% por transporte colectivo y un 4,0% por transporte de carga. En la Tabla 3 se puede observar la cantidad correspondiente a cada categoría e incluye mayor detalle con respecto al tipo de vehículo.

Tabla 3. Distribución según tipo de vehículo parque automotriz 2021

Categoría	Tipos	Cantidad (vehículos)	Porcentaje (%)
Transporte Particular y Otros	Automóvil, Station Wagon y Todo Terreno	3.980.688	66,6
	Furgón	225.784	3,8
	Minibús	29.038	0,5
	Camioneta	1.062.379	17,8
	Motocicleta y Similares	234.020	3,9
	Otros con Motor	2.159	0,0
Transporte Colectivo	Taxi Básico	32.178	0,5
	Taxi Colectivo	58.754	1,0
	Taxi Turismo	8.939	0,2
	Minibús, Transporte Colectivo	47.576	0,8
	Bus Transporte Colectivo	58.023	1,0
Transporte de Carga	Camión Simple	157.306	2,6
	Tractocamión	55.704	0,9
	Tractor Agrícola	7.438	0,1
	Otros con Motor /8	20.707	0,4

Fuente: Permiso de circulación, INE 2021

2.4. Motorización del parque vehicular

En Chile se pueden encontrar diferentes tipos de vehículos según la energía que utilizan. Usualmente la fuente de energía más popular es la bencina o gasolina, seguida por el diésel. Otros tipos de motores se pueden encontrar en menor cantidad, como lo son aquellos energizados con gas o electricidad junto a los motores híbridos, los cuales pueden funcionar con dos fuentes diferentes de energía, siendo estas electricidad y gasolina.

En la Tabla 4 se indica la motorización de los vehículos que solicitaron permiso de circulación en el año 2020. Estos datos son contrastados con los datos presentados por el

INE correspondiente a la motorización del parque vehicular en el año 2010 para de esta forma mostrar el cambio ocurrido en los diez años.

Tabla 4. Motorización del parque vehicular en Chile año 2010 y 2020

	Total (unidades) 2020	Porcentaje (%) 2020	Total (unidades) 2010	Porcentaje (%) 2010
Bencina	4.030.317	73,6	2.626.359	79,6
Diésel	1.441.463	26,3	669.788	20,3
Gas	4.640	0,1	4.715	0,1
Eléctrico/hibrido	2.866	0,1	41	0

Fuente: Elaboración propia

Nota: Datos del año 2020 obtenidos de Informe INE (Godoy, 2021) y datos del año 2010 obtenido de Informe INE 2010.

Asimismo, se puede observar que los vehículos a bencina y a diésel son las principales fuentes de energías durante los diez años. El diésel muestra un crecimiento en el año 2020 al igual que los vehículos eléctricos y a gas, sin embargo, el aumento de estos últimos es menor (ver Tabla 4).

Finalmente, en la Tabla 5 se indica la motorización del parque vehicular el año 2021 siendo la información más actual respecto a este.

Tabla 5. Motorización parque vehicular 2021.

	Total (unidades) 2021	Porcentaje (%) 2021
Bencina	4.371.984	73,1
Diésel	1.597.215	26,7
Gas	5.707	0,1
Eléctrico/hibrido	5.787	0,1

Fuente: Elaboración propia con datos INE 2021

Se observa que la tendencia se mantiene como el año anterior, disminuyendo el porcentaje de motores a bencina y aumentando el de diésel. Aunque el porcentaje de vehículos con motor a gas y eléctricos se haya mantenido, el número de eléctricos es el que presenta mayor aumento con un crecimiento de un 101,9% en relación con el 2020. Los vehículos a bencina, diésel y gas tienen un crecimiento de 8,5%, 10,8% y 23% respectivamente.

2.5. Uso de vehículos

INE informa en el año 2014 que autos particulares livianos y medianos recorren alrededor de 20 mil kilómetros anuales. En cuanto a los vehículos livianos y medianos de transporte colectivo, como los taxis, estos recorren 200 kilómetros diarios (Muñoz, 2018). Considerando 5 días de trabajo a la semana esto significaría 48 mil kilómetros anuales. Respecto a las motos, se estima que el uso promedio va de los 15 mil kilómetros hasta 20 mil kilómetros anuales (Font, 2013). Para camiones y buses, se utilizan los litros de diésel usados anualmente por vehículo (6.460 y 18.918 litros, respectivamente) obtenidos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (2020), los que junto con los rendimientos indicados en la Tabla 6 de la sección *2.5.1. Rendimientos*, se utilizan para obtener la cantidad de kilómetros recorridos siendo 24.548 kilómetros para camiones y 53.916 kilómetros para buses.

2.5.1. Rendimientos

El consumo de combustible está relacionado con el rendimiento del vehículo, es decir, la cantidad de kilómetros recorridos por litro de combustible utilizado. Éste puede variar según la velocidad, la forma de manejar, el tipo de camino y el tipo de vehículo. Además, de variar si se está en ciudad o carretera.

La Tabla 6 resume los valores de rendimiento promedio para buses, vehículos particulares, camiones, motos y vehículos a gas.

Tabla 6. Rendimientos según tipo de vehículo (combustibles convencionales)

Tipo de vehículo	Motor	Rendimiento	Unidades
Buses	Diésel	2,85	km/l
Particulares	Diésel	15,28	km/l
Particulares	Gasolina	17,11	km/l
Camiones	Diésel	3,80	km/l
Motos	Gasolina	22,70	km/l
Colectivos	GNC	28,57	km/l
Colectivos	GLP	13,33	km/l

Fuente: elaboración propia.

Nota: Buses, (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2016). Vehículos particulares, (Ministerio de Energía, 2021). Camiones, Webfleet, compañía que realiza seguimientos a vehículos de empresas (Hansen, 2022). Motos, (Michael, 2022). Vehículos a gas, (Muñoz, 2021).

El rendimiento de los vehículos eléctricos indica cuantos kilómetros recorre con un kilowatt hora de energía. Al igual que en el caso anterior, puede variar debido a varios factores, por lo que los valores mostrados en la Tabla 7 son aproximados.

Tabla 7. Rendimientos según tipo de vehículo (eléctricos)

Tipo de vehículo	Rendimiento	Unidades
Particulares	6,25	km/kWh
Camiones	0,96	km/kWh
Buses	0,67	km/kWh
Motos	43,48	km/kWh

Fuente: elaboración propia

Nota: Autos, (Taborelli, 2021). Camiones, (Basaure, 2021). Buses (Energía). Motocicletas (Greenmoto, 2020).

Con respecto a los vehículos que funcionan con hidrógeno, el consumo también está relacionado a distintos factores, entre ellos el tamaño del vehículo. Es así como los vehículos livianos y medianos requieren de 1 kilogramo de hidrógeno para recorrer 100 kilómetros, mientras que, para la misma distancia, buses requieren 8 kilogramos y camiones 11 kilogramos (Ministerio de Energía, 2019). Para producir un kilogramo de hidrógeno se requiere entre 55 y 60 kWh de energía (Ministerio de Energía; CWEEL; AEE, 2020).

2.5.1.1. Rendimiento futuro

En febrero del año 2022 se establece una norma general que “Fija estándar mínimo de eficiencia energética para vehículos motorizados livianos” (Gobierno de Chile, 2022). La norma incluye vehículos con combustibles líquidos o eléctricos y excluye motos.

La norma regirá el rendimiento de los próximos años y establece lo siguiente:

a) Desde el año 2024 hasta el 2026 el rendimiento mínimo es de 18,8 kilómetros por litro de gasolina equivalente.

b) Desde el año 2027 hasta el 2029, el valor es de 22,8 kilómetros por litro de gasolina equivalente.
c) A partir del año 2030 el rendimiento energético referencial mínimo es de 28,9 kilómetros por litro de gasolina equivalente.

La ley establece que para combustibles líquidos se debe calcular de la siguiente forma:

$$\mathit{R}\text{endimiento}_{\text{eq.original}} = \text{Rendimiento}_{\text{comb.original}} \cdot \frac{\rho_{\text{gasolina}} \cdot \text{PC}_{\text{gasolina}}}{\rho_{\text{comb.original}} \cdot \text{PC}_{\text{comb.original}}} \qquad (1)$$

Donde:

$\text{Rendimiento}_{\text{eq.original}}$: rendimiento del vehículo en kilómetros por litro de gasolina equivalente (km/l_{ge});

$\text{Rendimiento}_{\text{comb.original}}$: rendimiento del vehículo en kilómetro por litro del combustible utilizado (km/l_{orig});

ρ_{gasolina}: densidad de la gasolina en kilogramos por litro(kg/l);

$\rho_{\text{comb.original}}$: densidad de combustible utilizado (kg/l);

$\text{PC}_{\text{gasolina}}$: poder calorífico de la gasolina en kilojoule por kilogramo (kJ/kg);

$\text{PC}_{\text{comb.original}}$: poder calorífico del combustible utilizado en kilojoule por kilogramo (kJ/kg).

Para el caso de los vehículos eléctricos el rendimiento en base a gasolina equivalente se determina de la siguiente forma:

$$\text{Rendimiento}_{\text{eq.eléctrico}} = \text{Rendimiento}_{\text{eléctrico}} \cdot \frac{\rho_{\text{gasolina}} \cdot \text{PC}_{\text{gasolina}}}{3600 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}\right]} \qquad (2)$$

Donde:

$Rendimiento_{eq.eléctrico}$: rendimiento del vehículo eléctrico en kilómetros por litro de gasolina equivalente (km/l_{ge});

$Rendimiento_{eléctrico}$: rendimiento del vehículo eléctrico puro en kilómetros kilowatts hora utilizado (km/kWh);

$\rho_{gasolina}$: densidad de la gasolina en kilogramos por litro(kg/l);

$PC_{gasolina}$: poder calorífico de la gasolina en kilojoule por kilogramo (kJ/kg).

En el caso de los vehículos híbridos el rendimiento es el promedio ponderado de los rendimientos equivalentes eléctrico y original.

Con esta normativa el rendimiento que tendrían los vehículos livianos y medianos a diésel sería de 32,36 km/l y los que funcionan con gas licuado de petróleo sería de 23,52 km/l (Anexo 1).

2.5.2. Venta de gasolina

En el año 2021 en Chile se vendió un total de 4.899.921 metros cúbicos de gasolina (Comisión Nacional de Energía, 2022). Volumen usado en su totalidad para el transporte vehicular.

Tabla 8. Gasolina vendida en Chile 2021

Combustible	Volumen (m^3) 2021
Gasolina 93	2.901.300
Gasolina 95	1.317.163
Gasolina 97	681.458
Total	4.899.921

Fuente: elaboración propia con información de Energía Abierta.

2.6. Proyecciones volumen parque vehicular

La cantidad exacta de vehículos que habrá en Chile en los próximos años es desconocida. Sin embargo, distintas entidades han realizado estudios que buscan encontrar un número que se pueda asemejar a la realidad futura.

De acuerdo con las proyecciones del Coordinador Eléctrico Nacional se considera que para el año 2040 el parque vehicular contará con 6,8 millones de vehículos (Electromov, 2020).

Andrés Rebolledo, ministro de Energía durante los años 2016 al 2018, comentó en el 2017 que proyectaban alrededor de 5 millones de autos eléctricos en Chile para el 2050 lo que significaría un 40% del parque vehicular (Flores, 2017). Por lo tanto, se esperaría un parque total de 12,5 millones de vehículos.

Sin embargo, las proyecciones hechas por la Universidad de Santiago de Chile, donde se consideró la tasa de crecimiento de años anteriores de forma constante, para el año 2030 el parque vehicular chileno contaría con 8,6 millones de vehículos y para el año 2050 el total llegaría a 14 millones de unidades (Uriarte & Díaz, 2021).

2.7. Tecnologías actuales y emergentes para el control de emisiones

Diversos avances tecnológicos buscan reducir el impacto ambiental que producen los vehículos. Uno de sus focos son reducir las emisiones que generan al funcionar. Estos adelantos van desde agregar dispositivos para neutralizar contaminantes como a cambiar la energía utilizada por el motor del vehículo.

La mayoría de los vehículos en Chile y en el mundo utilizan motores a combustión interna que utilizan un combustible, bencina comúnmente, que es quemado para producir energía. Esta reacción produce emisión de químicos y partículas. Existen ciertos métodos para lograr que a pesar del uso de esta tecnología las emisiones sean controladas. Ejemplo de esto es el uso de catalizadores que evitan la emisión de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno convirtiéndolos en dióxido de carbono en el primer caso y en nitrógeno molecular y oxígeno en el segundo. Otras tecnologías son: filtros para los vehículos a diésel que retienen y eliminan partículas producidas en la combustión al ser ubicados en el tubo de escape; trampas NOx que almacenan los óxidos de nitrógeno que no se pudieron catalizar; y AdBlue el cual es un sistema que, mediante una solución de agua destilada y urea, neutraliza las emisiones de NOx causada por los motores de diésel (Soto, 2022).

Cambiar la energía con la cual funciona el vehículo es otra dirección que los fabricantes han tomado para disminuir el impacto de sus productos. Vehículos que funcionan con

electricidad, celdas de hidrogeno, biocombustibles, gas natural o una combinación de estas energías con energías convencionales, han sido la nueva apuesta.

Estas nuevas tecnologías han sido lo suficiente exitosas y eficientes para que países como Noruega, Chile, Irlanda y Japón, entre otros, hayan decidido que la venta de autos nuevos con gasolina y diésel deba ser eliminada dentro de un margen de tiempo (diferente y ajustado para cada país) dando paso solamente a la venta de vehículos que no emitan emisiones (Ministerio de Energía, 2020).

2.7.1. Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos son aquellos que cuentan con uno o más motores impulsados por energía eléctrica. Autos, motos, buses y vehículos pesados pueden funcionar con electricidad. Cabe destacar que el uso de este tipo de energía no es algo nuevo ya que el primer motor eléctrico fue hecho en el año 1834 mientras que el motor a combustión interna en 1861, sin embargo, no es hasta la última década que se está introduciendo en el mercado de manera relevante.

Para su funcionamiento los vehículos eléctricos cuentan de tres partes: batería, controlador y motor eléctrico. Como la batería funciona con corriente continua pueden requerirse transformadores en el caso de que la fuente de energía sea corriente alterna o que el motor funcione con este tipo de corriente.

Respecto a sus partes, la batería es donde se recibe y acumula la energía, usualmente son de ion-litio y deben ser recargadas conectándose a la red eléctrica. Por su lado, el controlador se encarga de administrar la energía y dirigirla al motor, el cual hará funcionar el vehículo. Los motores eléctricos suelen ser livianos y pequeños, además pueden ser de corriente continua o alterna. Los primeros pueden funcionar con energía proveniente directamente de la batería, mientras los segundos necesitan un inversor (Ruta 401, s.f.).

2.7.1.1. Tipos de vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos se pueden clasificar según su grado de electrificación:

- Eléctricos a batería o BEV *(battery electric vehicle)*: Vehículos que funcionan únicamente con energía eléctrica. No emiten emisiones durante su uso y cuentan

con un sistema de freno regenerativo con el cual se puede ocupar la energía cinética del vehículo al momento de frenar y utilizarla para alimentar la batería.

- Con celda de combustible de hidrógeno o FCEV *(fuel cell electric vehicle)*: Estos vehículos cuentan con una pila de hidrógeno en vez de una batería. Dentro de esta pila ocurre una reacción química donde el hidrógeno se oxida y pierde electrones los que generan corriente eléctrica. El hidrógeno es creado mediante electricidad y agua. No emiten emisiones al funcionar.
- Eléctricos de autonomía extendida o EREV (e*xtended-range electric vehicles)*: Vehículos que tienen un sistema de dos motores, uno eléctrico y otro a combustible. El motor eléctrico es el encargado del movimiento del vehículo mientras que el motor a combustible funciona en momentos determinados para producir energía y cargar la batería, la que también puede cargarse siendo conectadas a la red eléctrica. Es importante mencionar que este último no produce el movimiento del vehículo y que las emisiones solo se producen cuando este motor está en funcionamiento.
- Híbridos enchufables o PHEV *(plug-in hybrid electric vehicle)*: Cuentan con dos motores, uno eléctrico y otro a combustible, que pueden funcionar de manera autónoma o combinada. La batería se puede cargar mediante la red eléctrica permitiendo que funcione como vehículo totalmente eléctrico en distancias cortas. Se puede escoger que motor se usa de acuerdo con requerimientos del terreno, velocidad o distancias.
- Híbridos no enchufables o HEV *(hybrid electric vehicle)*: Al igual que los híbridos enchufables cuentan con dos motores, sin embargo, la batería del motor eléctrico es pequeña y solo se carga mediante el motor de combustión o con el sistema de freno regenerativo. Su autonomía eléctrica es de solamente un kilómetro.
- Híbridos suaves de 48 voltios: Vehículos que cuentan con un pequeño motor eléctrico que trabaja con el motor de combustión interna para entregarle potencia adicional al acelerar. Esto permite mejorar el rendimiento y el ahorro de combustible. La carga del motor eléctrico se hace con el sistema de freno regenerativo (Redondo, 2021).

2.7.1.2. Modos de recarga

La carga de los vehículos enchufables se estandariza en cuatro modos:

Modo de recarga 1 o enchufe no dedicado: El vehículo se conecta a una toma de corriente alterna no destinada para la carga de vehículos, como un enchufe doméstico Schuko. Este modo de carga es el más sencillo, pero altamente inseguro y, debido a la baja potencia, es lento y no aconsejado para vehículos o motos de mayor tamaño. Los problemas de este modo provienen por la falta de comunicación entre el cargador y el vehículo, lo que dificulta el control de la carga, además de la incertidumbre del estado de las instalaciones eléctricas y las muchas horas de carga, que incrementan el riesgo de calentamiento e incluso incendios.

Modo de recarga 2 o enchufe no dedicado con protección y control incorporado en el cable: La recarga se realiza utilizando un conector o adaptador, el cual es un cable que provee seguridad a la carga y permite seleccionar la velocidad. Utiliza corriente alterna. Este modo es útil cuando se tiene un vehículo eléctrico pequeño o un híbrido enchufable y su velocidad de carga es lenta, demorándose alrededor de 6 a 8 horas (LugEnergy, s.f.).

Modo de recarga 3 o enchufe dedicado: En este tipo de carga, también llamada semi-rápida, el vehículo se conecta a un punto de recarga de corriente alterna destinado exclusivamente a esta función el cual puede estar instalado en el hogar o en un lugar público. Para esto se necesita un dispositivo llamado *Wallbox* o caja de pared que, junto a un conector, brindan seguridad y control al proceso de carga. El modo 3 es especialmente aconsejado para autos híbridos enchufables con una autonomía alta o autos completamente eléctricos. Permite una carga de entre tres a cuatro horas y hasta 32 amperes de carga (LugEnergy, s.f.).

Modo de recarga 4 o cargador externo: El vehículo es recargado en una estación especializada ubicada fuera del hogar la cual funciona con corriente continua, con una carga mayor a 50kWh y puede lograr al menos 70% de la batería en menos de 30 minutos (LugEnergy, s.f.). En este caso la velocidad de carga no está limitada por el cargador sino por la capacidad del vehículo de recibir energía. Las electrolineras, estaciones como gasolineras, pero para vehículos eléctricos, ocupan este método de carga ya que es rápido y su costo es muy elevado para garajes particulares ya que requiere una mayor estructura.

Además de estos 4 modos de carga existe otro que está en desarrollo: la carga inalámbrica. Se espera que en un futuro los vehículos cuenten con una bobina para que puedan ser estacionados sobre otra bobina que crea un campo magnético permitiendo que sean cargados mediante inducción. Sin embargo, esto provoca un indeseado aumento en la temperatura, motivo por lo cual aún no es implementado (Gómez, 2020).

Cabe destacar, que el tiempo de carga puede variar según el tipo de carga, la capacidad de energía de la batería, el control de la temperatura del sistema y la potencia máxima permitida.

En cuanto a la carga para los vehículos con celda de combustible de hidrógeno, el método es similar a la recarga de combustible. En 5 minutos se puede reabastecer de 142 litros de hidrógeno que es lo que puede almacenar un Toyota Mirai, el auto a hidrógeno más popular en la actualidad (Villarreal, 2022). A sí mismo, un camión puede ser recargado en 10-11 minutos y recorrer 750 kilómetros (Ministerio de Energía, 2019).

2.7.1.3. Ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos y sus variantes tienen varias ventajas:

- Bajas o nulas emisiones: Aquellos vehículos que son completamente electrificados o utilizan hidrógeno no generan contaminantes. En el caso de los híbridos, solo emiten contaminantes cuando el motor a combustible está funcionando, por lo que la cantidad de emisiones está sujeta a la autonomía del motor eléctrico.
- Emiten menos ruido: Usualmente los autos completamente eléctricos o los híbridos cuando funcionan de forma eléctrica son completamente silenciosos, lo que disminuye la contaminación acústica. Sin embargo, para evitar accidentes desde el 2021 se les exige que emitan un mínimo de ruido para alertar a los transeúntes. No obstante, el sonido es obligatorio solamente desde el arranque hasta los 20 km/h y cuando va marcha atrás (Moreno S. , 2019).
- Eficientes energéticamente: Los vehículos eléctricos cuentan con tecnología enfocada en la eficiencia energética como el sistema de freno regenerativo que permite aprovechar la energía cinética no usada. Además, la mayoría tienen un motor con un 90% de eficiencia siendo un porcentaje muy elevado comparado a los

20-25% de eficiencia promedio de un motor de combustión interna (Majdalani, 2021). Cabe destacar que vehículos a hidrógenos presentan una eficiencia mucho menor debido a la perdida de energía al generar la electricidad (ver Anexo 7).

- Autonomía: En el caso de los vehículos que funcionan con hidrógeno, éstos pueden andar hasta mil kilómetros sin necesidad de reabastecerse. En el caso de los vehículos eléctricos, la autonomía puede llegar a 500 kilómetros (Díaz, 2022), pero el promedio es de 220 a 300 kilómetros.
- Bajos precios de carga: El costo de cargar un vehículo eléctrico puede variar según el lugar donde se esté ubicado, sin embargo, en promedio, el valor es la mitad que lo que se necesita para el repostaje de un vehículo a gasolina (KIA, s.f.).
- Incentivos: Debido a los beneficios ambientales de los vehículos eléctricos, muchos gobiernos han decidido dar incentivos por su uso. Algunos ejemplos son la eliminación de impuestos, la reducción de los valores de pagos de peajes, bonos y ayudas para la adquisición del vehículo.

A pesar de las muchas ventajas, también tiene algunos aspectos negativos que hace que aún no sea usado de manera popular:

- Cambio de baterías: Las baterías tienen una vida útil de seis a siete años y el valor del cambio puede ser elevado.
- Baja disponibilidad de cargadores y surtidores: En el caso de los vehículos enchufables un problema es la baja cantidad de cargadores en algunos países lo que dificulta el uso para viajes largos y provoca que los tiempos de carga sean mayores al no tener carga especializada. Algo semejante sucede con los vehículos que funcionan con hidrógeno ya que hay pocos surtidores de este compuesto.
- Altos costos de compra: Un vehículo eléctrico puede costar entre 20% y 70% más que un vehículo convencional de características físicas semejantes (Otiniano Pulido, 2021). Esta diferencia se ve reducida en el caso de los híbridos.

Cabe destacar, que muchas de estas desventajas están siendo abordadas y reduciendo su impacto a medida que la electromovilidad se populariza. Por ejemplo, el valor de las baterías pasó de 1.100 dólares a 137 dólares en 10 años y ahora hay vehículos que no necesitan que se cambie la batería en su totalidad sino solamente ciertos componentes

(Gatica & Almazabar, 2021). En cuanto a la carga, varios países han trabajado en el aumento de cargadores, buscando incentivar su uso y satisfacer la creciente demanda.

2.7.1.4. Vehículos eléctricos en el mundo

A nivel mundial la cantidad de vehículos eléctricos livianos y medianos ha ido en aumento. La tasa de crecimiento anual entre el año 2015 y el 2017 fue de 60%, mientras que el incremento en el año 2018 fue un 67% con respecto al año anterior. Para el año 2019 había 7,2 millones de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en el mundo (Ministerio de Energía, s.f.). Se estima que en el 2021 el 16% de los vehículos vendidos globalmente son eléctricos (BEV e híbridos) y se proyecta que para el 2035 estos alcancen el 89% de las ventas (Jenkins, 2022).

Noruega es uno de los pioneros en venta de vehículos eléctricos. En octubre del año 2022, el 86,4% de las ventas de vehículos en este país correspondieron a vehículos de esta tecnología, con un 89,7% de éstos totalmente eléctricos y un 10,4% híbrido (Dr. Holland, Norway's BEVs Still Growing Well, Even While PHEVs Fall Away, 2022). Esto significó un aumento de un 20% de registros de vehículos eléctricos comparando con octubre del año 2021, lo cual es una recuperación considerando que en septiembre los registros habían disminuido un 18,4% con respecto al mismo mes del año anterior (Randall, 2022). El éxito de los vehículos eléctricos se debe a la introducción de modelos más accesibles económicamente en el año 2010 y a los incentivos que implementó el gobierno desde 1990, como la subvención que permite que vehículos eléctricos estén exentos al pago de IVA, no paguen impuesto al carbono, tengan peaje y estacionamiento rebajados o gratis, e incluso tengan la facilidad de pasar por carriles no permitidos para el resto de los vehículos en caso de alto tráfico (Henley & Ulven, 2020). Los incentivos serán eliminados desde el año 2023 ya que las ventas de vehículos eléctricos ya son lo suficientemente altas para que signifique un alto costo para el gobierno por la pérdida de cobro de impuestos y para que se logre la meta de que el 100% de los autos vendidos en el 2025 sean eléctricos. Cabe destacar, que en cuanto al uso de vehículos y su relevancia en el parque vehicular del país, menos del 20% de los vehículos usados son eléctricos. Otros países europeos, como Suecia, Alemania e Inglaterra han seguido los pasos de Noruega respecto a las medidas económicas tomadas y han presentado un crecimiento aún más rápido de las ventas. En el 2022, Suecia logró que

un 46,1% de las ventas sean vehículos eléctricos (Dr. Holland, 2022), Reino Unido alcanzó un 20,2% de ventas de estos (Kane, 2022) y Alemania consiguió lograr un 40% de las ventas (Pontes, 2022). Cabe destacar, que este aumento en ventas se da dentro de un contexto de inflación y reducción de ventas en el mercado automotriz.

Siguiendo las tendencias de los países europeos, podemos encontrar a Estados Unidos el cual presenta solo 1% de vehículos eléctricos en su parque vehicular con una participación del 10% de las ventas en el 2021. Se proyecta que para el 2035 las ventas de autos eléctricos lleguen a un 100%, con un 68% de ellos solo eléctricos (Jenkins, 2022). A su vez, China presenta en el 2022 un 51% de las ventas de vehículos eléctricos (29% a batería) y se espera que para el 2025 se alcance un 50% de participación en ventas de vehículos totalmente eléctricos (Pontes, 2022).

Por su parte en Latinoamérica, Colombia es el país con mayor electromovilidad alcanzando a representar un 20,5% de las ventas del 2022 con 67.000 vehículos eléctricos puros e híbridos matriculados durante el primer semestre de ese año (Torres, 2022). Esto significó un aumento de un 256,1% en vehículos totalmente eléctricos respecto al mismo periodo del 2021 (Gutiérrez A. , 2022) Algunas medidas tomadas por el país fueron crear incentivos económicos para estos vehículos como descuentos de impuestos (60% para vehículos totalmente eléctricos y un 40% para híbridos), 30% de descuento en revisión técnica y estacionamientos exclusivos para vehículos eléctricos. Se espera que para el año 2030 un 6,7% del parque sea eléctrico (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2020). El siguiente país con mayor electromovilidad es México con una participación en las ventas de 4,4% (Dr. Zozaya, 2022) y un aumento de 352,2% de vehículos eléctricos puros (Gutiérrez A. , 2022).

En cuanto vehículos colectivos, países como China se han enfocado en el transporte eléctrico, logrando en este país ciudades con un 100% de buses eléctricos. Otros ejemplos son Reino Unido donde circulan 401 buses eléctricos, y Austria donde se registran 522 (González F. , 2019).

En cuanto a camiones de carga estos presentan mayores desafíos debido a que el mayor peso aumenta el requerimiento energético necesitándose ajustes en la estructura. Sin embargo, en distintos países de Europa como Alemania y Suecia se están probando nuevos

prototipos con mayor autonomía y menores tiempos de carga que se esperan vender desde 2023 (Fernández Munguía, 2020).

Con respecto a los puntos de carga, en Latinoamérica para el año 2020 había 1.292 estaciones públicas (Guarino, 2022). Por otro lado, en Europa en el año 2022 hay 374.000 cargadores públicos. Estos están concentrados en cuatro países: Países Bajos, Francia, Italia y Alemania (Mendoza, 2022).

2.7.2. Vehículos a gas

Los vehículos a gas ocupan la energía térmica de la quema del gas dentro del motor para crear energía cinética y permitir la movilidad del auto, de la misma forma que lo hace un auto que funciona con gasolina. Este tipo de tecnología se ha popularizado desde la década de los setenta sin embargo se inventó a comienzos del siglo XX (Ares, 2021).

La recarga del gas se hace de forma similar a la de los autos convencionales. Sus semejanzas permiten que sea posible convertir el motor de un auto convencional de forma que funcione con gas. Para esto se debe intervenir el vehículo agregando un estanque de almacenamiento y un kit de conversión (Gasco, s.f.). Cabe destacar que, a pesar de funcionar con un solo motor, este tipo de vehículos son bifuel, es decir que pueden funcionar con gas y luego ocupar un combustible derivado del petróleo como reserva (Rastreator, s.f.).

Sobre su uso mundial, en el año 2019 había 26 millones de vehículos a gas licuado de petróleo (ANSA, 2019), y solo en Europa había 15 millones de vehículos que ocupan este tipo de gas (Otero, 2020). En cuanto gas natural, Argentina es el líder mundial en este combustible donde hay 1,5 millones de vehículos con gas natural comprimido y con 1.700 estaciones de servicio. En cuanto Europa, Italia es el país con más implementación donde hay más de 430.000 vehículos a gas con 609 estaciones surtidoras.

2.7.2.1. Tipos de vehículos a gas

Los vehículos a gas se clasifican según el tipo de gas que utilizan, ya que ocupan diferentes compuestos gaseosos dependiendo de si utiliza gas licuado de petróleo o gas natural.

El gas licuado de petróleo o GLP es una mezcla de 70% de butano y 30% propano que es usada como combustible, siendo el combustible alternativo más utilizado en el mundo.

Por otro lado, el gas natural o GNV (gas natural vehicular) es metano gaseoso que puede presentarse de dos formas: gas natural comprimido (GNC) y gas natural licuado (GNL). Presenta una mayor proporción de hidrogeno que combustibles convencionales o que el GLP. El gas natural presenta menor impacto ambiental debido a que no emite azufre o plomo y reduce hasta un 97% las emisiones de monóxido de carbono y no emite partículas.

El gas natural comprimido es habitualmente usado para vehículos ligeros mientras que el gas natural licuado se utiliza en vehículos pesados, camiones y autobuses (Ares, 2021).

2.7.2.2. Ventajas y desventajas de vehículos a gas

Los vehículos que funcionan con gas presentan ventajas tanto para el propietario como para el medio ambiente:

- Rápido repostaje: El tiempo de repostaje de los vehículos a gas es igual a los vehículos convencionales siendo una ventaja en comparación con otros vehículos con energías alternativas.
- Autonomía: Presentan una gran autonomía permitiendo recorrer 1.300 kilómetros sin repostar debido a la capacidad de ocupar otro combustible de reserva. Ocupando solo GLP puede circular 500 kilómetros aproximadamente.
- Reducidas emisiones: Es el segundo carburante menos contaminante superado solo por el hidrógeno. Las emisiones de CO_2 y NO_x son menores que en los vehículos con gasolina.
- Menor costo entre tecnologías alternativas: Entre los autos con combustibles alternativos son los más baratos de adquirir, además que el gas es el carburante más barato. El GLP rinde un 30% más que la gasolina, mientras que el GNC un 40% más (Aguirre, 2013).
- Conversión: Es posible convertir vehículos a gasolina a vehículos a gas como solución a los valores más elevados de estos vehículos y a la baja oferta. Para convertir un vehículo este debe tener menos de cinco años de antigüedad y el valor

de este procedimiento en el año 2021 es de aproximadamente $500.000 pesos chilenos (Muñoz, Gas vehicular: ventas y costos del GLP, 2021).

En cuanto a las desventajas de los vehículos que funcionan a gas son:

- Baja oferta: En el mercado existen pocos vehículos que sean a gas de fabrica por lo que se prefiere hacer la conversión. Sin embargo, un vehículo de fábrica viene mejor preparado para el uso de gas, ya que por ejemplo sus válvulas son reforzadas evitando que a futuro se resequen lo cual es un problema común en los autos convertidos (Otero, 2020).
- Poca disponibilidad de lugares de repostaje: La cantidad de surtidores de gas es reducida, además son diferentes para cada tipo de gas, por lo que en comparación con la gasolina o el diésel se encuentra en desventaja (Rastreator, s.f.).

2.7.3. Vehículos con biocombustibles

Los biocombustibles son una fuente de energía creada a partir de biomasa, estos pueden ser de primera generación, es decir aquellos provenientes directamente de cultivos; de segunda generación, provenientes de desechos de cultivos u orgánicos urbanos; o de tercera generación, extraídos de plantas acuáticas. La mayoría de los combustibles utilizados actualmente son de primera y segunda generación. Algunos de los más usados son el bioetanol y biodiésel. Estos son utilizados para ser mezclados con gasolina y diésel respectivamente.

El biodiésel es un combustible que puede obtenerse a partir de lípidos naturales. Tiene forma líquida y puede utilizarse de sustituto a derivados del petróleo. Los vehículos con esta tecnología utilizan una mezcla con diferentes proporciones de diésel y biodiesel. La proporción de la mezcla es indicada con una “B” junto con el porcentaje de biodiésel que contiene, es decir que un 5% de biodiésel se indicaría como B5.

Motores de vehículos convencionales pueden ocupar sin ser modificados una mezcla de hasta 20% de biodiésel, es decir B20. Para proporciones mayores se requiere modificar el motor para evitar su deterioro.

El bioetanol es un líquido proveniente de la fermentación de azucares y se mezcla con gasolina. Para denotar el porcentaje de bioetanol que tiene la mezcla se utiliza una “E” y la proporción que tiene. En este caso, cuando el porcentaje de etanol es entre 5 y 10%, es decir E5 y E10, no se necesita hacer cambios en el vehículo, cuando el porcentaje es mayor (usualmente E85) se requiere un motor adaptado. Para ocupar solamente bioetanol se requiere un motor especial (Ibáñez, 2011).

En el mundo hay 53 países en los cuales es obligatorio mezclar gasolina con bioetanol siendo Brasil, Paraguay y Argentina quienes exigen un porcentaje mayor al 10%. De igual manera, 43 países regulan que los combustibles fósiles estén mezclados con biodiésel, destacándose Indonesia y Brasil. Suecia debido a su meta de reducción de gases de efecto invernadero, se apoya en el uso de biocombustibles los cuales conforman un 33% de la mezcla (Torroba, 2020).

2.7.3.1. Ventajas y desventajas de vehículos a biodiésel

Los beneficios del uso de biocombustibles son los siguientes:

- Disminuye emisiones de vehículos convencionales: Mezclar bioetanol o biodiésel con los combustibles convencionales puede disminuir emisiones como la de hollín en un 37% (Rocha-Hoyos, Llanes-Cedeño, Celi-Ortega, & Peralta-Zurita, 2019).
- Compatibilidad con la gasolina y el petróleo: La afinidad de los biocombustibles permiten que estos sean mezclados y utilizar en una gran cantidad de autos convencionales.
- Más amigable con el medio ambiente: Debido a que el biocombustible es de origen vegetal su impacto es menor, esto se destaca mayormente cuando se reutilizan aceites disminuyendo desechos. Cabe destacar, que lo ecológico de los biocombustibles depende mucho de la fuente donde se obtenga y el manejo del suelo en caso de que sea de primera generación.

Sin embargo, también hay desventajas para el usuario de los biocombustibles:

- Disolvente y corrosivo: El biodiesel puede provocar problemas en vehículos que no estén preparados para su empleo. Su capacidad de corrosiva puede afectar algunas partes del vehículo, sobre todo aquellas compuestas de goma, zinc o aluminio. De la

misma manera puede actuar como disolvente en motores antiguos (Frey, Como funcionan los automoviles con Bio Etanol E85, s.f.).

- Dificultades en almacenamiento: Debido a su biodegradabilidad su almacenamiento puede complicarse, además puede solidificarse a bajas temperaturas formando tapones.

2.7.4. Eco combustibles o *e-fuel*

Los eco combustibles específicamente los *e-fuels*, son combustibles líquidos sintetizados mediante hidrógeno y dióxido de carbono capturado proveniente de la filtración de aire. Para que sea realmente ecológico la electrólisis del hidrógeno debe ser causada por electricidad proveniente de fuentes renovables, como solar y/o eólica.

Por ahora este combustible sigue en investigación, sin embargo, se considera que su uso en el futuro puede ser tanto en el transporte terrestre como en la aviación.

2.7.4.1. Ventajas y desventajas de *e-fuels*

El uso de e-fuels tendría las siguientes ventajas:

- Combustible carbono neutral: La cantidad de dióxido de carbono emitida es la misma usada para la producción del combustible, por eso se le llama neutro.
- Transporte y almacenamiento: Los combustibles e-fuel se pueden transportar y almacenar de forma segura y durante un largo periodo de tiempo, además que se hace posible utilizar la estructura actual usada para combustibles convencionales (RACE, 2022).

En cuanto a las desventajas estas serían:

- Baja eficiencia: Dentro del proceso de generación de este tipo de combustible se pierde una gran cantidad de energía tanto en la electrolisis para la creación de hidrógeno como en la captación de CO_2. A esto se suma la baja eficiencia de los motores a combustión, lo que hace una eficiencia general de un 13% (ver Anexo 7).
- Alto costo: Debido a sus costos de producción puede que su precio sea más alto que el de combustibles convencionales (RACE, 2022).

- Emisiones de nitrógeno: se han hecho pruebas de laboratorio que han mostrado que vehículos que funcionan con e-fuel emiten igual cantidad de óxido de nitrógeno que combustibles fósiles (Autovista24, 2021).

2.8. Tecnologías para disminuir emisiones del transporte en Chile

A pesar de que los chilenos utilizan principalmente vehículos que funcionan con gasolina, Chile ha adquirido paulatinamente diferentes tecnologías buscando un mayor control y, con ello, una disminución de las emisiones causadas por el sector del transporte.

Una de las primeras adiciones popularizadas en Chile fue el uso de catalizadores en los vehículos lo que, al disminuir las emisiones, permitía que pudieran funcionar en días con restricciones vehiculares producto de la mala calidad de aire. En el 2020 solo un 2,4% de vehículos son no catalíticos (Godoy, 2021).

En los últimos años, vehículos que funcionan con energías renovables se han introducido en el mercado chileno respaldados con la necesidad de disminuir emisiones. Algunos han logrado ganar su espacio en el parque vehicular mientras que otros aún no se han popularizado.

La electromovilidad es parte esencial de los objetivos medioambientales chilenos y, a pesar de que solo es un pequeño porcentaje del parque vehicular, la cantidad de vehículos eléctricos ha ido en aumento. En septiembre del año 2022 el 1,4% de las ventas de vehículos corresponden a vehículos eléctricos, ya sean híbridos o puros (ANAC, 2022).

Para marzo del año 2022 en Chile hay 347 “electrolineras”, es decir puntos de carga públicos especializados, y 3.074 vehículos eléctricos puros o híbridos enchufables, que se conforman por 26 camiones, 41 buses interurbanos, 838 buses urbanos y 2.169 vehículos livianos y medianos. Esto significa que desde julio del 2020 los puntos de carga aumentaron en 199, los camiones en 24, buses interurbanos en 23, buses urbanos en 96 y en 1.344 los vehículos livianos y medianos (Ministerio de Energía, 2020).

En Chile se pueden encontrar una gran variedad de vehículos eléctricos de todos los tipos, salvo de celdas de hidrógeno ya que esta tecnología aun no llega al sector de transporte del

país. Cabe mencionar que en el año 2021 el 17% de los vehículos eléctricos eran a batería, el 83% restante pertenecían a diferentes rangos de híbridos (Mendoza Benavente, 2021).

La mayoría de los autos eléctricos se encuentran en las ciudades más grandes del país, Santiago principalmente, ciudad que además concentra la mayor cantidad de puntos de carga. El modelo de auto más vendido en Chile es Hyundai Ioniq (Diálogo Chino, 2021).

En cuanto al transporte público, del total de buses nombrado anteriormente la mitad se encuentra en la Región metropolitana y la otra mitad desplegado en el resto de las regiones. Se espera que entre el año 2022 y el año 2023 se sumen mil buses eléctricos en Chile (Manzur, 2022).

Respecto a los tipos de carga para vehículos eléctricos disponibles en Chile en el año 2021 se podían encontrar de carga semi rápida, carga rápida y uno de carga ultra rápida (Portaluppi, 2021). Se estima que para el año 2024, habrá 81 mil autos eléctricos en Chile, por lo que se necesitarán 2.300 puntos de carga a lo largo del país (Enel, s.f.).

Un gran desafío para la electromovilidad en Chile es la falta de electrolineras en los lugares más lejanos a la capital lo que dificultan la adquisición de vehículos eléctricos para los habitantes de estas regiones e incapacitan a aquellas personas que ya cuenten con uno de poder salir de su ciudad y recorrer el país. “ElectroRuta” es el nombre del proyecto de Enel X, que busca crear una red de carga eléctrica a lo largo de Chile para el año 2024. Se busca instalar 1.200 puntos que conecten Arica con Punta Arenas permitiendo recorrer 5 mil kilómetros (Enel, s.f.).

Con respecto a los vehículos que funcionan a gas, su uso viene desde hace 20 años en el país, sin embargo, entre el año 2009 y el año 2019 la cantidad de vehículos a gas tuvo un crecimiento de 104,8% (Ochoa, 2020) logrando 9.902 ejemplares. Sin embargo, en el año 2020 presenta una caída llegando a 4.640 vehículos. De acuerdo con otras fuentes, en el año 2022 son 8.500 vehículos que funcionan con gas natural comprimido en Chile, estando concentrados principalmente en Santiago y Punta Arenas (AGN, s.f.). En cuanto a los que funcionan con gas licuado de petróleo, la cantidad de estos asciende a 30.000 vehículos (Frey, Autos nuevos de GLP en Chile en Mayo 2022, 2022). Cabe destacar, que este combustible es usado principalmente en vehículos colectivos.

Por otro lado, en el año 2008 Chile aprobó la mezcla de gasolina o diésel con biocombustibles. El porcentaje permitido en la mezcla es de 2 o 5%. En el año 2011 un bus del Transantiago funcionó con biodiésel durante un año, sin embargo, el uso de los biocombustibles no ha logrado popularizarse (Revista Electricidad, 2010).

2.9. Matriz energética

La matriz energética es el conjunto de fuentes de energía de un país que permiten la generación eléctrica, la realización de actividades industriales, de transporte, entre otras.

Puede categorizarse como matriz energética primaria y matriz energética secundaria. La primaria consiste en aquellos recursos naturales que son ocupados de forma directa como fuente de energía como la energía solar y la biomasa. A su vez, la matriz energética secundaria requiere ser transformada para su uso, ya sea desde una fuente primaria u otra secundaria, ejemplos de matriz energética secundaria son la electricidad y los derivados del petróleo.

Los últimos datos oficiales informados por el gobierno indican que en el año 2020 la matriz energética primaria de Chile estaba compuesta por un 25,48% petróleo crudo, 21,34% carbón mineral, 17,63% gas natural, 25,05% biomasa, 5,93% hídrica, 2,18% solar, 1,53% eólica, 0,27% biogás y 0,59% geotermia. Lo que indica una gran presencia de recursos fósiles no renovables. De acuerdo con el Ministerio de Energía de Chile, en ese año la totalidad del petróleo fue importado, mientras que en años anteriores se producía alrededor de un 2% en territorio nacional. El carbón y el gas natural también son mayoritariamente importados con un 93,7% y un 79,4% de energía producida proveniente de fuente importadas.

La matriz energética secundaria del año 2020 estaba principalmente conformada por derivados de petróleo, seguidos de electricidad, biomasa y, en menor medida, carbón, gas natural y biogás.

Los principales consumidores de energía son el sector industrial (39,7%), sector transporte (33,2%), sector comercial, público y residencial (23%), autoconsumo (3,5) y no energético (0,7%).

2.9.1. Matriz eléctrica

La matriz eléctrica corresponde a aquellas fuentes de energía, ya sean primarias o secundarias, utilizadas para generar electricidad.

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) conecta centrales y empresas generadoras desde Arica hasta Chiloé alcanzando un 98,5% de la población chilena. El resto del territorio cuenta con el Sistema de Aysén (SEA) y Sistema de Magallanes.

SEN representa el 99,3% de la capacidad total del país. En el año 2020, la electricidad del sistema era generada utilizando carbón (18,7%), biomasa (1,7%), gas natural (18,5%), energía hídrica (25,9%), solar (13,6%), eólica (9,6%), refinados de petróleo (11,9%) y geotermia (0,2%) (Generadoras de Chile, 2020).

El boletín de generación de mayo 2022 indica que actualmente el SEN cuenta con una capacidad instalada de 32.000 MW los cuales son generados utilizando un 15,8% carbón, 15,7% gas natural, 10,7% derivados del petróleo, 23,1% energía hídrica, 20,7% solar, 11,9% eólico, 1,9% biomasa y 0,2% geotérmica. Lo que muestra un aumento en el uso de energías renovables no convencionales como lo son la energía solar y la energía eólica para generar electricidad en Chile (Generadoras de Chile, 2022).

2.10. Políticas y proyecciones sobre fuentes de energía

Dentro de los próximos años se planifica seguir una política energética centrada en lograr una matriz más segura, estable, eficiente y con mayor uso de energías renovables que permitan disminuir las emisiones producidas por la generación de energía, sector que lidera en las emisiones de GEI en Chile.

Los cambios buscados son integrales que apuntan modificar diferentes sectores de la matriz energética y su consumo.

Inicialmente, el informe “Energía 2050” publicado en el año 2017, indica metas de la política energética respecto el uso de energías renovables como que éstas constituyan el 60% de la generación eléctrica para el año 2035 y al menos un 70% para el año 2050 (Ministerio de Energía, 2015). Además, el resto de las industrias generadoras deben utilizar de forma eficiente la infraestructura ya existente y privilegiar la integración de tecnologías

de bajas emisiones y costo eficientes. El documento también plantea el cierre paulatino de centrales a carbón hasta eliminarlas en su totalidad para el 2040.

Luego, en marzo del 2022, se publica la Política Energética Nacional actualizada, donde se establecen metas más ambiciosas adelantando el cierre total de las centrales a carbón para el año 2030 y estipulando que para el año 2050 las emisiones por generación de energía deben ser cero. Esto debido a que en el año 2020 se logró alcanzar un 20% de energías renovables no convencionales lo cual se había planteado para el año 2025 (Ministerio de Energía, 2022).

Cabe destacar que Chile cuenta con grandes oportunidades en cuanto fuentes primarias especialmente en la energía solar y eólica debido a las características de su territorio, por lo que se puede esperar que sea una de las fuentes renovables que presente mayor desarrollo en los próximos años.

Se espera que a futuro el transporte se aleje de los derivados del petróleo, lo que aumentaría la demanda eléctrica en un 35% (Ministerio de Energía, 2020). Sumándole relevancia dentro de las emisiones correspondientes a la matriz energética y por lo tanto reafirmando la necesidad de apoyar la matriz eléctrica en energías renovables.

Además, se proyecta que para el 2050 el hidrógeno verde se habrá introducido en el país como combustible y tendrá una participación entre un 7% y 24% de los recursos energéticos. Se considera que su generación representará entre un 19% y 43% de la demanda eléctrica nacional (Ministerio de Energía, 2015). Se espera que sea un hidrógeno altamente competitivo nacional e internacionalmente debido a los bajos costos de producción y de generación de energías renovables (Ministerio de Energía, 2020).

Si se aprovechan las oportunidades del país, se siguen las estrategias y se alcanzan las metas, los cambios en la matriz energética pueden significar una reducción de un 30% en las emisiones de GEI al año 2030 (Ministerio de Energía, 2015) y un 60% para el año 2050 (Ministerio de Energía, 2022).

2.11. Metas para la carbono neutralidad en Chile

Con el gran objetivo de convertirse en un país carbono neutral desde el 2050, como plazo máximo, es que Chile establece en la contribución determinada a nivel nacional (NDC) una serie de metas en diferentes sectores tanto sociales como energéticos, que se conectan con los objetivos de desarrollo sustentable. Así mismo, existe la Estrategia climática de largo plazo de Chile (ECLP), documento que indica el camino para lograr a las metas deseadas. Cabe destacar que la NDC es actualizada cada cinco años y el ECLP cada 10 años, buscando ajustar las metas y estrategias según los logros y desafíos.

Una meta en cuanto a ventas de vehículos en los próximos años busca que todos los vehículos nuevos no produzcan emisiones en su uso, es decir, que sean totalmente eléctricos. Como muestra la Figura 1, esta meta tiene diferentes plazos para cada categoría de vehículo.

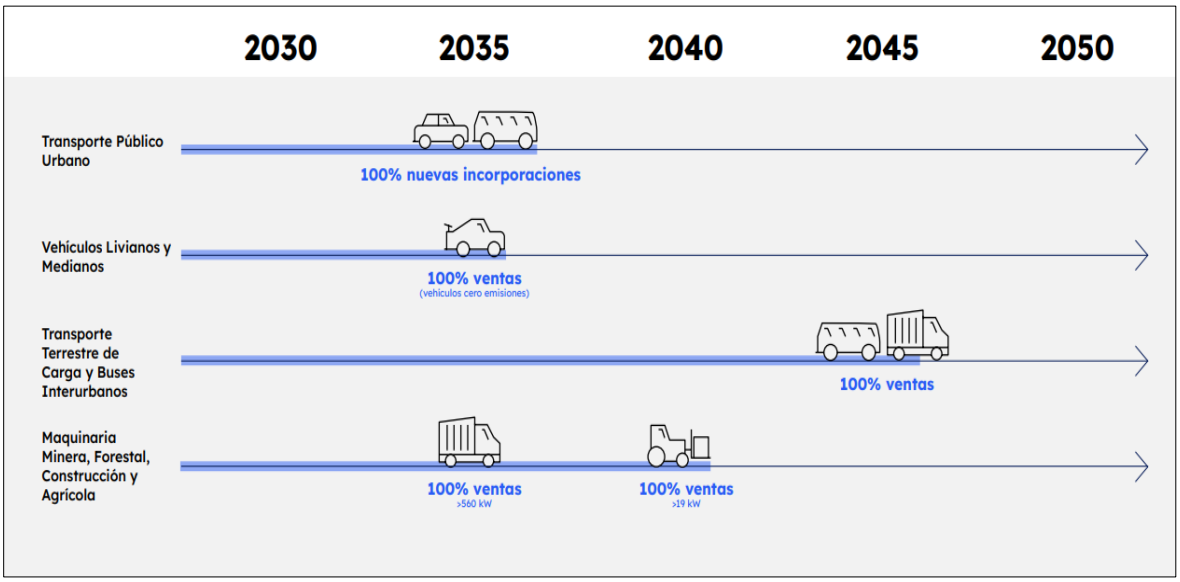

Figura 1. Metas por año sobre la venta de vehículos eléctricos puros.

Fuente: Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía, 2022)

Otras metas con respecto a las condiciones del parque vehicular de los próximos años son las siguientes:

- Para el 2040 la totalidad de los buses, taxis y colectivos en todo Chile no deben emitir emisiones (Gobierno de Chile, 2020).

- Para el año 2050, el 71% de los vehículos de carga deben funcionar con hidrógeno.
- Incentivar el uso de transporte colectivo y bicicleta en vez de transporte particular.
- Con respecto a los vehículos livianos y medianos particulares, en el año 2017 se estipuló que un 40% de estos deben ser eléctricos para el año 2050 (Gobierno de Chile, 2020). Sin embargo, en la NDC del 2020 se plantea una meta más ambiciosa, indicando que con las medidas sectoriales correctas el porcentaje de vehículos eléctricos puede llegar a un 58%.

Estas metas de electromovilidad están acompañadas con el objetivo de que para el año 2050 el uso de energías renovables en la matriz eléctrica podría llegar a un 100% (Gobierno de Chile, 2020).

Se espera que, mediante estas metas, para el año 2050 se logre una reducción de un 35% de emisiones en el transporte terrestre con relación a los valores del 2018 (Ministerio de Energía, 2022), lo que, junto con medidas de otros sectores, ayudaría al país a conseguir la carbono neutralidad.

Actualmente para lograr las metas, el gobierno de Chile ha presentado subsidios para el transporte público, enfocados en taxis para incentivar la adquisición de vehículos eléctricos, además del impuesto verde para la compra de vehículos particulares el cual no es pagado por vehículos totalmente eléctricos. A su vez, impulsa proyectos instalación de electrolineras a lo largo del país. Cabe destacar que la implementación puede verse afectada, ya sea negativa o positivamente, por los precios de los combustibles fósiles, el costo de las tecnologías y el crecimiento o contexto económico del país.

2.12. Huella de carbono

Es posible cuantificar el impacto ambiental de un producto, proceso o estilo de vida de una persona mediante el cálculo de su huella de carbono. Este indicador considera las emisiones de gases de efecto invernadero de la actividad en estudio, es decir las emisiones de vapor de agua, metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, gases fluorados y ozono troposférico. Para ello utiliza la medida “dióxido de carbono equivalente” la cual engloba los demás GEI mediante la multiplicación de la masa del gas a considerar y su potencial de calentamiento. De esta forma se indica cuanto CO_2 es necesario para provocar el mismo forzamiento

radiativo o variación en el flujo energético en la troposfera, dejando el total de emisiones expresadas en masa de CO_2 equivalente. El motivo del uso de esta escala es que el gas de referencia es el GEI más emitido por las actividades humanas.

La huella de carbono puede ser usado para diferentes estudios, ya sea a personas y sus hábitos, empresas, eventos y productos. Para ello separa las emisiones en directas e indirectas. Las primeras son aquellas que su emisión puede ser controlada directamente por la persona o empresa, mientras que las indirectas consideran aquellos aspectos fuera del control de la entidad. Cabe destacar que mayor huella de carbono indica un mayor impacto ambiental.

Para el caso de una persona, la huella de carbono considera sus actividades dentro de un periodo de tiempo, como el transporte diario, tipo de alimentación, uso de electricidad, uso de combustibles fósiles, viajes en avión en el último año, entre otras.

En el caso de un producto el cálculo puede incluir todo el ciclo de vida de éste, desde su creación y extracción de sus materias primas, hasta el término de su vida útil y su residuo.

Para una empresa el cálculo abarca todas las actividades tanto del sistema productivo como administrativas.

Frecuentemente el cálculo del indicador divide las actividades en tres categorías:

- Alcance 1: Actividades que provocan emisiones directas, usualmente dentro de las propiedades de las empresas o del individuo y que por lo tanto son controlables. Ejemplo de esto son el uso de combustibles para procesos y uso de vehículos.
- Alcance 2: Principalmente consumo de energía para procesos, viviendas o edificios. Esto se considera una actividad indirecta ya que, a pesar de que el consumo de electricidad es controlable por la persona o empresa, las emisiones causadas para su generación no lo son.
- Alcance 3: Actividades indirectas con emisiones no controlables. Por ejemplo, el transporte del producto una vez comprado, el trabajo de empresas externas o viajes de negocios.

Para calcular la huella de carbono el método es el mismo para todas las categorías de alcance y para las diferentes posibles entidades de estudio. Se multiplican los datos de consumo (como litros de combustible, kilómetros recorridos, kilowatts hora consumidos, etcétera) por el factor de emisión que considere las unidades del consumo.

2.13. Factor de emisión

El factor de emisión corresponde a un valor numérico que indica la masa de contaminante equivalente en función de alguna unidad de consumo, siendo reflejo de las emisiones de una actividad. A mayor factor de emisión mayor es la contaminación causada.

$$Emisiones\ de\ GEI = Datos\ de\ actividad \cdot Factores\ de\ emisión \tag{3}$$

Es posible clasificar los factores de emisión según si reflejan las emisiones de fuentes fija o fuentes móviles. Para el primer caso, el factor de emisión depende principalmente de la actividad realizada, tipo de combustible, tecnologías, entre otros aspectos, siendo un ejemplo de fuente fija una industria. En el caso de las fuentes móviles, como los vehículos, es necesario conocer el tipo de combustible utilizado, tecnologías de control de emisiones y condiciones de uso.

Para utilizar factores de emisión se puede recurrir a registros disponibles en distintas plataformas que permiten obtener estos indicadores que, de otra forma, son calculados en base a mediciones de emisiones y modelaciones.

2.13.1. Registro de factores de emisión

En Chile se siguen las *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. En este documento se pueden obtener los valores por defecto de los factores de emisión cuando se hacen análisis de nivel 1 o se puede utilizar como guía para obtener los factores de forma específica a cada país lo cual es necesario para niveles 2 y 3.

También existen registros internacionales específicos a algunos países como la perteneciente al gobierno de Reino Unido, específicamente al Departamento de Medio

Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (*Department for Environment, Food and Rural Affairs)* o DEFRA. Los factores de emisión de estos registros a pesar de ser calculados en Reino Unido son utilizados también por organizaciones internacionales debido a su actualización anual y la consideración de diversas actividades (UK Government, 2021).

Otra fuente internacional pertenece al Protocolo de Gases de Efecto Invernadero *(Greenhouse Gas Protocol)* o GHG *Protocol* el cual se creó mediante el trabajo conjunto de *World Resources Institute* y *World Business Council for Sustainable Development* quienes recibieron la cooperación de organizaciones, ONGs, empresas y gobiernos para crear una guía estandarizada sobre cálculo de emisiones ayudando así a empresas o países (Greenhouse Gas Protocol, s.f.).

2.13.2. Factores de emisión transporte terrestre

El informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile 1999-2018 indica que en lo que respecta el transporte terrestre Chile ocupa los factores por defecto de las *Directrices de IPCC del 2006* para dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, con los cuales calcula los GEI nacionales.

Para el CO_2, las emisiones de dos diferentes tipos de vehículo que ocupen el mismo combustible varían solamente por el consumo, lo que hace posible considerar un factor de emisión para cada combustible. En el caso del CH_4 y N_2O, se requiere mayor detalle de las características del vehículo ya que las emisiones en la combustión varían según la tecnología.

La Tabla 9 indica los factores de emisión estándar de IPCC 2006 para el CO_2.

Tabla 9. Factores de emisión de dióxido de carbono equivalente según tipo de combustible de vehículo

Tipo de combustible	Factor de emisión de CO_2eq por defecto (kg/TJ)
Gasolina para motores	69300
Gas/Diesel Oil	74100
Gas licuado de petróleo	63100
Gas natural comprimido	56100
Gas natural licuado	56100

Fuente: elaboración propia con directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Se considera una incertidumbre de un 5% al utilizar estos factores de emisión por defecto.

La Tabla 10 muestra los factores de emisión estándar de IPCC 2006 para el CH_4 y N_2O.

Tabla 10. Factores de emisión metano y óxido nitroso

Tipo de vehículo	Combustible	kg CH_4/TJ	kg N_2O/TJ
Automóviles	Gasolina	25,0	8,0
Automóviles	Gas/Diésel	3,9	3,9
Automóviles	Gas natural	92	3,0
Automóviles	Gas licuado de petróleo	62	0,2
Camiones y Buses	Gasolina	33,0	3,2
Camiones y Buses	Gas/Diésel	3,9	3,9
Motocicletas	Gasolina	3,8	5,7

Fuente: elaboración propia con datos extraídos de capítulo 3, IPCC 2006

2.13.2.1. Potenciales de calentamiento global

Como se menciona anteriormente, los potenciales de calentamiento permiten indicar la cantidad de GEI en términos de dióxido de carbono equivalente ya que indican la capacidad de calentamiento en relación con la del CO_2.

En la Tabla 11 se muestran los PCG calculados en tres reportes de IPCC que permiten incluir CH_4 y N_2O dentro del cálculo de huella de carbono.

Tabla 11. Valores de potencial de calentamiento global

Nombre	Valores PCG para un horizonte de 100 años		
	SAR	AR4	AR5
Dióxido de carbono	1	1	1
Metano	21	25	28
Óxido nitroso	310	298	265

Fuente: elaboración propia con información extraída de *Global Warming Potential Values* (GHG Protocol, 2016)

2.13.3. Factores de emisión matriz energética chilena

El sistema nacional de energía tuvo un factor de emisión promedio de 0,4056 toneladas de dióxido de carbono equivalente por mega watt hora generado en el año 2021. Esto significó un aumento de años anteriores ya que en los años 2019 y 2020 se tuvieron factores de emisión promedio de 0,3907 y 0,3834 toneladas de dióxido de carbono equivalente por mega watt hora generado, respectivamente.

2.14. Huella de carbono histórica del transporte terrestre en Chile

El informe del *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos* hecho por el Ministerio de medio ambiente de Chile y por SNI indica el total de GEI emitidos por el transporte terrestre desde el año 1990 al 2018. Estos son indicados en la Tabla 12.

Tabla 12. Emisiones históricas calculadas de INGEI

Año	Emisiones (kt CO_2 eq)
1990	7.150,9
2000	14.218,3
2010	18.049,0
2013	21.174,2
2016	22.965,7
2017	23.176,6
2018	24.600,4

Fuente: elaboración propia con información de INGEI (Ministerio de Medio Ambiente; SNI, 2020)

Se puede observar que la cantidad de emisiones han ido en constante aumento y que el último estudio oficial de emisiones del sector considera hasta el 2018, es decir, hace cuatro años aproximadamente.

3. Marco metodológico

Conociendo el estado actual del transporte terrestre y la integración de las nuevas tecnologías con energías renovables, junto con las metas de Chile respecto a su uso, es que se busca determinar escenarios del estado del transporte para el año 2050 y calcular las emisiones de cada una de las posibles realidades.

Los distintos escenarios presentan diferentes niveles de introducción de energías renovables y de éxito en la disminución de emisiones, además de que sirven como base de análisis para determinar el efecto que podrían tener variaciones con respecto a la matriz energética o el uso de otros combustibles, fuera de las metas propuestas.

Para realizar las proyecciones pertinentes al parque vehicular hay que conocer la cantidad de vehículos que habrá en Chile en las siguientes décadas, el porcentaje de cada categoría de vehículo y los kilómetros recorridos para conocer sus requerimientos energéticos.

Asimismo, es importante conocer las emisiones del parque vehicular del 2021 para obtener una base con la cual se pueda comparar y concluir respecto a los avances.

3.1. Alcance y enfoque

Para realizar los cálculos se considera todo el parque vehicular motorizado de Chile basándose en los datos obtenidos del INE 2021.

Las emisiones consideradas corresponden a aquellas emitidas durante el uso del vehículo, no en su creación, debido a que Chile ya no manufactura vehículos, ni en el término de su vida útil.

Se considera también las emisiones provenientes de la matriz energética producto de la integración de vehículos eléctricos, pero no las emisiones producto a la creación de gasolina y otros combustibles fósiles ya que estos son importados al país.

Se estudian los vehículos a gasolina, diésel y gas licuado de petróleo, en el caso de los combustibles. Para los eléctricos se estudian los 100% eléctricos, híbridos y a hidrógeno. No se consideran *e-fuels* debido a que aún están en fase de estudio, ni biocombustible debido a que en Chile no lograron popularizarse.

Debido a que para alcanzar la carbono neutralidad se necesita el descenso de emisiones de otras actividades y/o sectores del país además del transporte, es que, para saber si es que las disminuciones de emisiones de cada escenario ayudarán al logro de ésta, se considerará una ayuda significativa a una disminución mayor o igual a un 40% con relación al resultado del 2021, esto de acuerdo con la baja de emisiones esperadas en el informe de Transición Energética de Chile (Ministerio de Energía, 2022).

3.2. Procedimiento

Para realizar los cálculos de huella de carbono actuales y futuros se hará lo siguiente:

Para el año 2021 se calculará la cantidad de combustible o kilowatts necesarios para el funcionamiento anual de cada vehículo. Con este dato, se calculará cuanta energía es necesaria por vehículo lo cual es necesario para luego hacer uso de los factores de emisión. Se utilizará el total de cada categoría de vehículos para que los valores consideren todo el parque vehicular. Sabiendo cuanta energía consume cada categoría de vehículos a combustible, se utilizarán los factores de emisión de CO_2, N_2O y CH_4 y se utilizará sus respectivos PCG para obtener las emisiones totales en dióxido de carbono equivalente. Para los vehículos eléctricos, se utilizará el factor de emisión de la matriz energética. Con estos datos se obtendrán las emisiones totales.

Para el año 2050, el proceso será similar, cambiando solamente los primeros pasos de este, donde se deberá suponer diferentes escenarios referentes a la cantidad de vehículos correspondiente a cada energía y ajustar los rendimientos para el año de estudio.

Una vez calculados los datos para cada escenario futuro se harán análisis variando parámetros para observar el efecto de condiciones que podrían ser relevantes en la cantidad de emisiones. Las condiciones analizadas será el uso de vehículos híbridos, hidrógeno y GLP, además de la variación del factor de emisión de la matriz eléctrica.

3.3. Categorías de vehículos

Los vehículos se dividirán en cinco tipos de vehículos que a su vez serán clasificados según la fuente de energía usada. Los tipos de vehículos mencionados en el informe del INE son distribuidos en las cinco categorías como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Categorías de vehículos y su alcance

Tipo de vehículos	Tipo de motor	Considera
Vehículo liviano y mediano (VLM)	Bencina/gasolina	Vehículos particulares como Automóvil, Station Wagon, Todo Terreno, furgón, minibus, camioneta y otros vehículos con motor
	Diésel	
	Eléctrico	
	Híbrido	
Colectivos	Bencina/gasolina	Taxi clásico, taxi colectivo y taxi turismo
	Diésel	
	Eléctrico	
	Híbrido	
	GLP	
Motos	Bencina/gasolina	Motocicletas y similares
	Eléctrico	
Buses	Diésel	Mini bus transporte colectivo y bus transporte colectivo
	Eléctrico	
Camiones	Diésel	Camión simple, tractocamión, tractor agrícola y otros vehículos con transportes de carga con motor
	Eléctrico	

Fuente: elaboración propia

3.4. Proyecciones

Para determinar los escenarios futuros a analizar se considerarán diferentes porcentajes de uso de vehículos con tecnologías no convencionales, eléctricos principalmente, considerando escenarios optimistas y pesimistas.

3.4.1. Supuestos

Para poder comparar la efectividad del cambio en el parque automotriz en los distintos escenarios, se consideran los siguientes supuestos:

- El volumen total de los vehículos utilizados es el mismo en todos los escenarios.
- Los kilómetros recorridos por los vehículos actualmente será el mismo que en el año 2050 e igual para todos los escenarios.

- Para el año 2050 se considerará como rendimiento promedio el rendimiento mínimo estándar establecido por el gobierno de Chile para vehículos livianos y medianos (VLM) que utilicen combustibles líquidos, suponiendo que todos los vehículos cumplirán con la cantidad establecida desde el año 2030 por la norma. Sin embargo, esto no será así para los vehículos livianos y medianos eléctricos, ya que el rendimiento mínimo exigido es menor que el rendimiento promedio actual, a diferencia de los otros casos, por lo que se supone que no habrá un retroceso en el rendimiento, al verse poco probable una variación negativa en cuanto a la eficiencia.
- Los combustibles fósiles se seguirán importando al país.
- El 100% de los vehículos son catalíticos en todos los escenarios.
- El porcentaje de vehículos perteneciente a una clasificación y/o tipo se mantendrá.
- Se mantendrá el uso de la proporción entre la gasolina y el diésel para los vehículos que aún utilicen combustibles convencionales.
- El rendimiento de los vehículos híbridos cuando estén utilizando el motor eléctrico será igual a la de un vehículo totalmente eléctrico. A su vez, cuando funcionen con gasolina el rendimiento será igual al de un vehículo que funciona completamente con este combustible.

3.4.2. Escenarios

Los distintos escenarios se dividirán en dos categorías principales: optimistas y pesimistas.

En los escenarios optimistas se cumplirán las metas del gobierno en cuanto al uso de electromovilidad. Por otro lado, en el caso de los pesimistas se considerará que las condiciones del parque vehicular se mantienen como en la actualidad o que presentan un crecimiento insuficiente para lograr la presencia deseada de la electromovilidad en el transporte.

La Tabla 14 muestra los dos escenarios optimistas. El Escenario 1 contempla los objetivos hechos en el último NDC, donde se presentan metas más ambiciosas, por lo tanto, este escenario mostrará las mejores condiciones. El Escenario 2 presenta menor ambición en cuanto a la introducción de electromovilidad, más ajustado a las metas y proyecciones anteriores al NDC.

En los escenarios 1 y 2 se consideran que todos los vehículos eléctricos son a batería de acuerdo con la Política Energética Nacional actualizada en el 2022 y considerando que se espera vender desde el 2035 solamente vehículos cero emisiones. Sin embargo, se plantean dos subescenarios: Escenario 1.1 y Escenario 2.1, donde se considerará el logro de las metas de electromovilidad, pero con la ayuda de vehículos híbridos. Para esto se usará una distribución de los vehículos eléctricos de 60% BEV o totalmente eléctrico y un 40% híbridos. Esto debido a que en un informe del Ministerio de Energía suponen este porcentaje para el 2050 (Ministerio de Energía, 2020).

Además, en cada escenario se variará el factor de emisión de la matriz eléctrica, para analizar el efecto de una mayor demanda eléctrica producto de los vehículos eléctricos, y estudiar la relevancia de un cambio en la matriz para afrontar esta mayor presión en lo que respecta las emisiones.

Dentro del Escenario 1 también se analizará el uso de camiones a hidrógeno. Para esto, se compararán las emisiones de los camiones eléctricos calculados en el escenario original con las emisiones que emitidas en el caso de que estos mismos camiones funcionarán con hidrógeno.

Tabla 14. Escenarios optimistas 2050

Optimista		
Categorías	**Escenario 1**	**Escenario 2**
VLM	58% eléctricos, 31% gasolina y 11% diésel	40% eléctricos, 44% gasolina y 16% diésel
Colectivos	100% eléctricos	100% eléctricos
Motos	58% eléctricas y 42% gasolina	40% eléctricas y 60% gasolina
Buses	100% eléctricos	100% eléctricos
Camiones	71% eléctrico	71% eléctrico

Fuente: elaboración propia con datos de metas de transporte de NDC 2020

Cabe destacar, que no se considera en los escenarios optimistas los vehículos con otros combustibles, como GLP, debido a que actualmente su porcentaje es pequeño y, adicionalmente, los esfuerzos del gobierno van centrados a vehículos cero o bajas emisiones, lo que no se consigue con este.

Con respecto a los escenarios pesimistas, como se observa en la Tabla 15, estos muestran menor introducción de energías de bajas emisiones. El Escenario 3 contempla proyecciones hechas por el gobierno de Chile y IEA (*International Energy Agency*) donde se considera los efectos de las medidas tomadas actualmente respecto a la integración de vehículos eléctricos. Para los VLM, motos y colectivos se utilizan las proyecciones hechas en la NDC chilena del 2020, a su vez, para camiones y buses se utilizan proyecciones de las políticas mundiales actualmente activas.

El Escenario 4, el cual es el que hay menor introducción de energías eléctricas y mantiene los porcentajes actuales de cada tecnología.

Tabla 15. Escenarios pesimistas 2050

Pesimista		
Categorías	**Escenario 3**	**Escenario 4**
VLM	58% gasolina, 21% diésel y 21% eléctrico	73% gasolina, 27% diésel y 0,09% eléctrico (17% BEV y 83% HEV)
Colectivos	58% gasolina, 21% diésel y 21% eléctricos	69% gasolina, 25% diésel y 5,71% GLP
Motos	79% gasolina y 21% eléctricas	100% gasolina
Buses	65% diésel y 35% eléctrico	99,17% diésel y 0,83% eléctrico
Camiones	90% diésel y 10% eléctrico	99,99% diésel y 0,01% eléctrico

Fuente: elaboración propia con datos de NDC 2020 y Global EV Outlook 2022 (IEA, 2022).

Para los casos pesimistas también se analiza las variaciones en la matriz energética de modo de analizar si, aunque haya menor integración de vehículos sin emisiones, la matriz energética pueda amortiguar la situación. Además de esto se analiza la introducción de GLP en el Escenario 3, para observar su utilidad.

3.4.3. Número total de vehículos

El volumen de vehículos permitirá conocer las emisiones totales producto del transporte terrestre en Chile. La cantidad existente ha sido proyectada por diversas entidades sin embargo las estimaciones presentan una gran diferencia entre ellas.

Se decide utilizar el valor total de 12,5 millones de vehículos ya que es un valor presentado por el ministro de transporte durante el año 2016-2018, Andrés Rebolledo, lo que indica que esta estimación forma parte de las consideraciones del gobierno al realizar sus metas.

También, en el último informe del INGEI que analiza las emisiones desde 1990 hasta el 2018, ante la falta de datos para algunos años dentro del rango calcularon las tasas de crecimiento existente en ese periodo, las cuales se pueden observar en la Tabla 16.

Tabla 16. Tasa de crecimiento anual INGEI

Tipo de vehículo	Tasa de crecimiento anual
Automóviles	2%
Todo terreno	5%
Buses	2%
Camiones livianos	2%
Camiones	3%
Agrícola	-2%
Motocicletas	-5%

Fuente: elaboración propia con datos del informe de INGEI (Ministerio de Medio Ambiente; SNI, 2020)

Utilizando los datos se hicieron cálculos proyectando los valores al año 2050 (Anexo 2) obteniendo alrededor de 12,7 millones de vehículos. Este valor se ocupa para respaldar la alternativa escogida pero no es utilizado debido a la gran cantidad de supuestos usados para su cálculo, el ajuste que se debió hacer por las categorías y que el cálculo original de las tasas tenía un objetivo y años de estudio diferente.

3.5. Número de vehículos por categoría 2021 y 2050

Gracias a los datos obtenidos del INE es posible saber cuántos vehículos hay en el año 2021, datos que se encuentran detallados ya sea por tipo de vehículo o energía utilizada. Sin embargo, debido a que no indica la cantidad de vehículos por tipo que utilizan cierta fuente de energía es que se decide utilizar las proporciones de diésel y gasolina actuales sobre los vehículos particulares y sobre los colectivos, es decir que del total de vehículos que utilicen estos combustibles un 73,2% utilizará gasolina y un 26,6% diésel. En el caso de los buses y camiones se considera que actualmente utilizan principalmente diésel, al ser vehículos de mayor tamaño y, en menor cantidad, funcionan con motores eléctricos. A su vez, se considera que la totalidad de motos son a gasolina.

La cantidad de vehículos eléctricos son principalmente asignados a los vehículos particulares livianos y medianos, salvo por las cantidades conocidas de buses y camiones eléctricos mencionadas anteriormente en el marco teórico. Dentro de los vehículos livianos y medianos que son eléctricos, se considera que un 17% son eléctricos y un 83% híbridos de acuerdo con el informe de ANAC, mientras que en vehículos de mayor tamaño se considera que son solamente eléctricos.

Para el 2050, para saber la cantidad de vehículos que hay por cada categoría, se utilizarán los porcentajes del 2021. Por ejemplo, en el 2021 un 89% eran vehículos livianos y medianos, por lo tanto, se considerará que para el 2050 el 89% de los 12,5 millones de vehículos que hay en el parque vehicular corresponderán a esa categoría. En cuanto al tipo de combustible que ocupen los vehículos, se asignarán ciertos porcentajes de cierto tipo de energía (como se observa en los escenarios planteados) y con el resto se seguirá la misma lógica de proporción que en el 2021.

3.6. Cálculo de emisiones parque vehicular

Para obtener las emisiones del transporte terrestre en Chile del año 2021 y las del año 2050 es importante usar los factores de emisión adecuados. Para mantener la concordancia con los informes de INGEI es que se utilizaran los factores de emisión del IPCC 2006 y los potenciales de calentamiento global de AR4.

3.6.1. Nomenclatura

Para los cálculos los vehículos se separarán según su tipo de combustible o energía utilizada.

$$i = Tipo\ de\ energía;\ \{1 = bencina, 2 = diésel, 3 = gas, 4 = eléctricos, 5 = híbridos\}$$

Además, se dividirán según el tipo de vehículo, concordando con las categorías y los datos disponibles.

$$j = Tipo\ de\ vehículos; \{1 = livianos\ y\ medianos\ particulares, 2 = colectivos, 3 = motos, 4 = buses, 5 = camiones\}$$

Por lo tanto, X_{ij} corresponde a un vehículo del tipo j que funciona con una energía i.

También se considerarán tres diferentes gases de efecto invernadero los cuales se incluirán en las ecuaciones.

$$u = Gases\ de\ efecto\ invernadero;\ \{1 = CO_2, 2 = CH_4, 3 = N_2O\}$$

3.6.2. Huella de carbono

Para calcular la huella de carbono de un vehículo se utiliza la Ecuación 4. Los factores de emisión corresponden a cada GEI estudiado para el caso de combustibles líquidos, y a la matriz energética para el caso de los vehículos que eléctricos.

$$Emisión_u = Total\ de\ vehículos_{ij} \cdot Consumo_{ij} \cdot FE._{iju} \quad (4)$$

Donde:

$Emisión_u$: corresponde a las emisiones de gases de efecto invernadero del contaminante u en kilotonelada por año;

Total de $vehículos_{ij}$: número de vehículos de tipo j que utilizan energía de tipo i;

$Consumo_{ij}$: cantidad de energía tipo i utilizada por un vehículo tipo j durante un año;

FE_{iju}: factor de emisión del contaminante u para un vehículo j que funcione con el combustible i.

3.6.3. Consumo de combustible y electricidad

Para calcular la cantidad de combustible requerido por cada vehículo anualmente se utilizan los kilómetros totales recorridos en un año y el rendimiento del vehículo.

$$Consumo\ de\ combustible = \frac{Distancia\ recorrida}{Rendimiento} \quad (5)$$

Donde:

Consumo de combustible: corresponde al volumen en litros de combustible líquido i usado por un vehículo de tipo j en un año;

Distancia recorrida: kilómetros anuales promedio recorridos por un vehículo tipo j;

Rendimiento: rendimiento promedio de un vehículo j en kilómetros recorridos por litro de combustible i usado.

En el caso del consumo eléctrico, se seguirá la misma lógica, sin embargo, el rendimiento estará dado por los kilómetros recorridos con un kilowatt hora utilizado como se muestra en la Ecuación 6.

$$Consumo\ eléctrico = \frac{Distancia\ recorrida}{Rendimiento\ eléctrico} \tag{6}$$

Donde:

Consumo eléctrico: es la cantidad de electricidad en kilowatt hora consumida por un vehículo tipo j eléctrico en un año;

Distancia recorrida: kilómetros recorridos por un vehículo j eléctrico en un año;

Rendimiento eléctrico: kilómetros recorridos por kilowatts hora usados para un vehículo j eléctrico.

Notar que, para los vehículos eléctricos con hidrógeno, su consumo se calculará considerando que para 100 kilómetros necesita 11 kilogramos de hidrógeno los que se producen con 632,5 kWh. Por lo tanto, el rendimiento eléctrico de estos será 0,16 km/kWh.

Cabe destacar, que se utilizará el promedio de aquellos rendimientos actuales que se informaron en forma de rango en el marco teórico.

3.6.3.1. Cálculo energético

Para calcular cuánto es el consumo energético requerido por un vehículo y poder utilizar los factores de emisión del IPCC, se debe convertir el consumo volumétrico de combustible a unidades energéticas.

El primer paso es utilizar la densidad perteneciente a cada combustible para convertir el combustible usado a unidades de masa.

$$Consumo\ de\ combustible = Volumen\ de\ combustible \cdot \rho_{combustible} \quad (7)$$

Donde:

Consumo de combustible: masa de combustible usada en kilogramos al año usados por un vehículo tipo i.

Volumen de combustible: es la cantidad de combustible i que utiliza un tipo de vehículo j en litros al año;

$\rho_{combustible}$: densidad del combustible i en kilogramos por litro.

Para convertir el consumo en unidades energéticas se utilizan los poderes caloríficos superiores.

El consumo energético en terajoule se obtiene mediante la Ecuación 9.

$$Consumo = \frac{Consumo\ combustible \cdot PCS \cdot factor\ PCI}{10^9} \cdot Factor\ de\ conversión \quad (8)$$

Donde:

Consumo energético: corresponde a la cantidad de energía en terajoule al año que utiliza un vehículo de tipo j con un combustible i;

Consumo de combustible: cantidad de combustible i utilizado en un vehículo tipo j en kilógramos al año;

PCS: poder calorífico superior del combustible i en kilocaloría por kilogramo;

Factor PCI: número que permite convertir PCS a PCI. El valor es de 0.95 según IPCC 2006 para diésel y gasolina y 0.90 para gas licuado de petróleo (Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero);

Factor de conversión: corresponde al paso de tera calorías a tera joule, se utiliza el valor constante 4.1868.

3.6.4. Cálculo emisiones

Para calcular las emisiones de combustibles líquidos se utilizará la Ecuación 4 donde se utilizarán los factores de emisión correspondientes para cada GEI según el combustible usado.

Una vez obtenidos los resultados para dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, se calculan las emisiones totales en kilo tonelada de dióxido de carbono equivalente ocupando la Ecuación 9.

$$GEI_{combustible} = Emisión_{CO_2} \cdot PCG_{CO_2} + Emisión_{CH_4} \cdot PCG_{CH_4} + Emisión_{N_2O} \cdot PCG_{N_2O} \quad (9)$$

En cuanto a los vehículos eléctricos se utilizará la Ecuación 4 indicada anteriormente.

Finalmente,

$$Emisiones\ totales = GEI_{combustibles} + GEI_{eléctricos} \quad (10)$$

3.6.5. Variación de datos para análisis

Para realizar el análisis de la matriz eléctrica se utilizará el factor de emisión del 2021, el cual se multiplicará por un factor que producirá su cambio porcentual y, en base al valor obtenido, se calculará las emisiones totales.

Desde el escenario más optimista, es decir el Escenario 1, se estudiará el aumento de la electromovilidad, considerando el caso que las metas sean superadas. Para esto se elevará el porcentaje de vehículos eléctricos en rangos de 10%, desde un 58% a un 98% de participación en el parque vehicular.

Además, se estudiará el efecto de los vehículos híbridos con una variación que irá en función del total de vehículos eléctricos de los vehículos livianos y medianos, es decir, se partirá con cero híbridos terminará con 100% de éstos, teniendo aumentos de un 10%.

Finalmente, para analizar el uso de vehículos GLP es que se considerará un 21% de éstos dentro de los vehículos colectivos del Escenario 3. Esta integración se hará de tres formas en distintas ocasiones: intercambiando el 21% de vehículos eléctricos, intercambiando el 21% de vehículos diésel, y restando porcentaje a los vehículos a gasolina para lograr un 21% de GLP en el escenario. A su vez en el Escenario 4 se hará una variación de los vehículos colectivos a GLP en base a su valor inicial hasta tener un crecimiento de un 100%.

3.6.6. Datos usados

Para realizar los cálculos se utilizó Excel donde se utilizaron todos los decimales de los datos y cálculos, salvo para los números de vehículos, donde el valor se redondeó a un número entero, y casos especiales donde se tuvieran los datos sin decimales. En Anexo 3 se encuentran las conversiones de unidades, densidades y poderes caloríficos.

Tabla 17. Kilómetros recorridos 2021 y 2050

Tipo de vehículo	Kilómetros recorridos al año (km/año)
VLM	20.000
Autos colectivos	48.000
Buses colectivos	53.916
Camiones	24.548
Motos	17.500

Fuente: elaboración propia

Para los híbridos se considera que anualmente recorren 7.500 kilómetros sin emitir emisiones (Plötz, Moll, Bieker, Mock, & Li, 2020), y el resto de los kilómetros lo recorren con gasolina.

Tabla 18. Distribución del parque vehicular

Tipo de vehículo	Porcentaje
VLM	88,6%
Autos colectivos	1,7%
Motos	3,9%
Buses colectivos	1,8%
Camiones	4,0%

Fuente: elaboración propia basándose en informe INE 2021

4. Resultados

4.1. Resultados 2021

La Tabla 19 muestra el consumo total de energía requerida por cada categoría de vehículo estudiada. Se puede observar que los híbridos presentan dos consumos con diferentes unidades, esto es debido al uso de distintas fuentes de energías producto de su motor eléctrico y motor a gasolina.

En el Anexo 4 se pueden encontrar los consumos de combustibles y energéticos por vehículo.

Tabla 19. Cantidad total de vehículo por categoría y su consumo energético

Tipo de vehículo	Motor	N° de vehículos	Consumo total por categoría	Unidades
VLM	Gasolina	3.878.306	165.080,36	TJ/año
VLM	Diésel	1.416.860	60.314,06	TJ/año
VLM	BEV	830	2.656,00	MWh/año
VLM	Híbrido	4.052	107,78 4862,40	TJ/año MWh/año
Colectivo	Gasolina	68.968	7.045,51	TJ/año
Colectivo	Diésel	25.196	2.574,15	TJ/año
Colectivo	Gas	5.707	515,21	TJ/año
Motos	Gasolina	234.020	5.866,94	TJ/año
Buses colectivos	Diésel	104.720	72.146,30	TJ/año
Bus eléctrico	Eléctrico	879	70.614,32	MWh/año
Camiones	Diésel	241.129	56727,49	TJ/año
Camión eléctrico	Eléctrico	26	663,78	MWh/año

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O por los vehículos que utilizan combustibles líquidos son mostradas en el Anexo 4.

Considerando los potenciales de calentamiento, las emisiones de gases de efecto invernadero de los combustibles líquidos son 27.355,61 kt CO_2 equivalente al año. La Tabla 20 muestra el detalle de las emisiones.

Tabla 20. Emisiones de GEI de combustibles

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones (kt CO_2 eq/año)
VLM	Gasolina	11.936,80
VLM	Diésel	4.545,25
VLM	Híbridos	7,79
Colectivo	Gasolina	509,45
Colectivo	Diésel	193,99
Colectivo	Gas	33,34
Motos	Gasolina	417,10
Buses colectivos	Diésel	5.436,92
Camiones	Diésel	4.274,97
Total		27.355,61

Fuente: elaboración propia

En cuanto a los vehículos eléctricos, el consumo pudo multiplicarse directamente con el factor de emisión de la matriz energética, dando un total de 31,96 kilotoneladas de CO_2 equivalente al año. La Tabla 21 muestra las emisiones de las cuatro categorías.

Tabla 21. Emisiones vehículos eléctricos 2021

Tipo de vehículo	Emisiones (kt CO_2 eq/año)
VLM BEV	1,08
VLM híbrido	1,97
Bus	28,64
Camión	0,27
Total	31,96

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, las emisiones totales en el año 2021 fueron **27.387,57** kilotoneladas de CO_2 equivalente.

4.2. Resultados 2050

Los resultados a continuación corresponden a aquellos que se utilizan para cada escenario del 2050. Se presentará como emisión final de cada escenario las emisiones provenientes de combustibles líquidos ya que se considerará una matriz de cero emisiones, a menos que se especifique lo contrario.

La Tabla 22 muestra la cantidad de cada tipo de vehículo en el año 2050.

Tabla 22. Número de vehículos según categoría 2050

Tipo de vehículo	Total
VLM	11.077.412
Colectivos	208.736
Motos	489.116
Buses	220.708
Camiones	504.028

Fuente: elaboración propia

Con los rendimientos del año 2050 se calculó el consumo por vehículo de cada categoría, tanto para los vehículos a combustibles (ver Tabla 23) como para los vehículos eléctricos (ver Tabla 24).

Tabla 23. Consumo de combustible por vehículo 2050

Tipo de vehículo	Combustible	Consumo l/año
VLM	Gasolina	692,04
VLM	Diésel	617,97
Colectivos	Gasolina	1.660,90
Colectivos	Diésel	1.483,13
Colectivos	GLP	2.040,50
Motos	Gasolina	770,93
Buses	Diésel	18.917,89
Camiones	Diésel	6.460,00

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Consumo por vehículo eléctrico 2050

Tipo de vehículos	Consumo eléctrico kWh/año
VLM	3.200,00
VLM híbridos	1.200,00
Colectivos	7.680,00
Colectivos híbridos	1.200,00
Motos	402,48
Buses	77.022,86
Camiones	25.570,83
Camiones H_2	153.425,00

Fuente: elaboración propia

4.2.1. Escenario 1

La Tabla 25 muestra la cantidad de vehículos por tipo y motorización para el Escenario 1.

Tabla 25. Número de vehículos (Escenario 1)

Tipo de vehículos	Motor	Cantidad
VLM	Gasolina	3.433.998
VLM	Diésel	1.218.515
VLM	Eléctrico	6.424.899
Colectivos	Eléctrico	208.736
Motos	Eléctrico	283.687
Motos	Gasolina	205.429
Buses	Eléctrico	220.708
Camiones	Eléctrico	357.860
Camiones	Diésel	146.168

Fuente: elaboración propia

Las emisiones por contaminante se pueden observar en la Tabla 26.

Tabla 26. Emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O (Escenario 1)

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones CO_2 $ktCO_2$/año	Emisiones CH_4 $ktCH_4$/año	Emisiones N_2O ktN_2O/año
VLM	Gasolina	5.352,07	1,93	0,62
VLM	Diésel	2.030,66	0,11	0,11
Motos	Gasolina	356,67	0,13	0,04
Camiones	Diésel	2.546,39	0,11	0,13
Emisiones totales		10.285,78	2,27	0,90

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de vehículos con combustibles son **10.610,78** kilotoneladas de CO_2 equivalente por año (ver Tabla 26).

Para mayor detalle de los resultados ver Anexo 5.1.

4.2.1.1. Escenario 1.1

La Tabla 27 muestra la cantidad de vehículos por categoría para el Escenario 1.1.

Tabla 27. Número de vehículos (Escenario 1.1)

Tipo de vehículos	Motor	Cantidad
VLM	Gasolina	3.433.998
VLM	Diésel	1.218.515
VLM	Eléctrico	3.854.939
VLM	Híbrido	2.569.960
Colectivos	Eléctrico	208.736
Motos	Eléctrico	283.687
Motos	Gasolina	205.429
Buses	Eléctrico	220.708
Camiones	Eléctrico	357.860
Camiones	Diésel	146.168

Fuente: elaboración propia

La Tabla 28 resume las emisiones del Escenario 1.1. Para mayor detalle de los resultados ver Anexo 5.1.1.

Tabla 28. Emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O (Escenario 1.1)

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones CO_2 $ktCO_2$/año	Emisiones CH_4 $ktCH_4$/año	Emisiones N_2O ktN_2O/año
VLM	Gasolina	5.352,07	1,93	0,62
VLM	Diésel	2.030,66	0,11	0,11
VLM	Híbridos	2.504,58	0,90	0,29
Motos	Gasolina	356,67	0,13	0,04
Camiones	Diésel	2.546,39	0,11	0,13
Emisiones totales		12.790,36	3,18	1,19

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, las emisiones del Escenario 1.1. dan un total de **13.224,12** kilo toneladas de CO_2 equivalente considerando una matriz eléctrica sin emisiones.

4.2.1.2. Variación de híbridos

Luego de variar los porcentajes de vehículos totalmente eléctricos e híbridos dentro de los 58% correspondiente al total de vehículos eléctricos del Escenario 1 y dentro de los 40% de vehículos eléctricos del Escenario 2, se obtiene las emisiones de la Tabla 29. En el Anexo 5.1.2. se puede observar las emisiones para diferentes factores de emisión de la matriz eléctrica.

Tabla 29. Variación de vehículos total y parcialmente eléctricos

Porcentajes dentro del 58% de eléctricos		Emisiones (kt CO2 / año)	
Vehículos BEV	**Vehículos HEV**	**Escenario 1**	**Escenario 2**
100%	**0%**	10.610,78	14.052,08
90%	**10%**	11.286,65	14.502,65
80%	**20%**	11.962,51	14.953,23
70%	**30%**	12.525,73	15.403,80
60%	**40%**	13.201,59	15.854,38
50%	**50%**	13.877,45	16.304,95
40%	**60%**	14.553,31	16.755,53
30%	**70%**	15.229,17	17.206,10
20%	**80%**	15.792,39	17.656,68
10%	**90%**	16.468,25	18.107,25
0%	**100%**	17.144,11	18.557,83

Fuente: elaboración propia

4.2.1.3. Camiones a hidrógeno en Escenario 1

Se obtiene que si 71% de los camiones funcionará con hidrógeno estos consumirían 54.904.670,50 MWh al año, correspondiendo un 51% de los 106.768.694,94 MWh consumidos por la totalidad de vehículos eléctricos. La Tabla 30 muestra el consumo de camiones a hidrógeno y camiones eléctricos.

Tabla 30. Camiones a hidrógeno y eléctricos

	Hidrógeno MWh/año	**Eléctrico MWh/año**
Consumo por camión	153,43	25,57
Consumo total	54.904.670,50	9.150.778,42

Fuente: elaboración propia

La cantidad de emisiones que este consumo significaría depende de la composición de la matriz eléctricas. En Anexo 5.1.3. se muestra las emisiones totales del transporte con diferentes factores de emisión por parte de la generación de electricidad.

4.2.2. Escenario 2

De acuerdo con las características del Escenario 2, la Tabla 31 muestra el número de vehículos, según tipo, que utilizan combustibles líquidos y motores eléctricos.

Tabla 31. Número de vehículos (Escenario 2)

Tipo de vehículos	Motor	Cantidad
VLM	Gasolina	4.874.061
VLM	Diésel	1.772.386
VLM	Eléctrico	4.430.965
Colectivos	Eléctrico	208.736
Motos	Eléctrico	195.646
Motos	Gasolina	293.470
Buses	Eléctrico	220.708
Camiones	Eléctrico	357.860
Camiones	Diésel	146.168

Fuente: elaboración propia

La Tabla 32 muestra las emisiones del Escenario 2.

Tabla 32. Emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O (Escenario 2)

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones CO_2 ($ktCO_2$/año)	Emisiones CH_4 ($ktCH_4$/año)	Emisiones N_2O (ktN_2O/año)
VLM	Gasolina	7.596,48	2,74	0,88
VLM	Diésel	2.953,69	0,16	0,16
Motos	Gasolina	509,52	0,18	0,06
Camiones	Diésel	2.546,39	0,16	0,13
Emisiones totales		13.606,08	3,24	1,23

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de vehículos con combustibles son **14.052,08** kilotoneladas de CO_2 equivalente por año.

Mayor detalle de los resultados del Escenario 2 se encuentra en el Anexo 5.2.

4.2.2.1. Escenario 2.1

De acuerdo con las características de este escenario, la Tabla 33 muestra el número de vehículos, según tipo, que utilizan combustibles líquidos y motores eléctricos.

Tabla 33. Número de vehículos (Escenario 2.1)

Tipo de vehículos	Motor	Cantidad
VLM	Gasolina	4.874.061
VLM	Diésel	1.772.386
VLM	Eléctrico	2.658.579
VLM	Híbrido	1.772.386
Colectivos	Eléctrico	208.736
Motos	Eléctrico	195.646
Motos	Gasolina	293.470
Buses	Eléctrico	220.708
Camiones	Eléctrico	357.860
Camiones	Diésel	146.168

Fuente: elaboración propia

Tabla 34. Emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O (Escenario 2.1)

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones CO_2 ($ktCO_2$/año)	Emisiones CH_4 ($ktCH_4$/año)	Emisiones N_2O (ktN_2O/año)
VLM	Gasolina	7.596,48	2,74	0,88
VLM	Diésel	2.953,69	0,16	0,16
VLM	Híbridos	1.727,30	0,62	0,20
Motos	Gasolina	509,52	0,18	0,06
Camiones	Diésel	2.546,39	0,16	0,13
Emisiones totales		15.333,38	3,86	1,42

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de los combustibles líquidos en el Escenario 2.1. dan un total de **15.854,15** kilotoneladas de CO_2 equivalente (ver Tabla 34).

4.2.3. Escenario 3

La Tabla 35 muestra el número de vehículos por tipo de motorización en el escenario considerando las proporciones determinadas.

Tabla 35. Número de vehículos (Escenario 3)

Tipo de vehículos	Motor	Cantidad
VLM	Gasolina	6.409.555
VLM	Diésel	2.341.600
VLM	Eléctrico	2.326.257
Colectivo	Gasolina	120.778
Colectivo	Diésel	44.124
Colectivo	Eléctrico	43.835
Motos	Gasolina	386.402
Motos	Eléctrico	102.714
Buses	Diésel	143.460
Buses	Eléctrico	77.248
Camiones	Diésel	453.625
Camiones	Eléctrico	50.403

Fuente: elaboración propia

Tabla 36. Emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O (Escenario 3)

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones CO_2 $ktCO_2$/año	Emisiones CH_4 $ktCH_4$/año	Emisiones N_2O ktN_2O/año
VLM	Gasolina	9.989,63	3,60	1,15
VLM	Diésel	3.902,29	0,21	0,21
Colectivo	Gasolina	451,77	0,16	0,05
Colectivo	Diésel	176,48	0,01	0,01
Motos	Gasolina	670,87	0,04	0,06
Buses	Diésel	7.318,85	0,39	0,39
Camiones	Diésel	7.902,58	0,42	0,42
Emisiones totales		30.412,47	4,82	2,28

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de los vehículos a combustibles son 31.211,30 kilotoneladas de CO_2 equivalente. Considerando una matriz eléctrica sin emisiones este valor correspondería a las emisiones de todo el parque automotor.

Emisiones en transporte colectivo usando GLP:

Considerando una matriz eléctrica sin emisiones, se obtienen los resultados expresados en la Tabla 37.

Tabla 37. Variación de vehículos con GLP (Escenario 3)

Escenario	Emisiones de colectivos a combustible $ktCO_2$ eq	Emisiones total escenario $ktCO_2$ eq
Original	650,87	31.211,30
GLP reemplaza total eléctricos	809,81	31.370,25
GLP reemplaza total diésel	631,46	31.191,90
GLP reemplaza 36,21% gasolina	638,68	31.199,11

Fuente: elaboración propia

Mayor detalle de los resultados del Escenario 3 se encuentra en el Anexo 5.3.

4.2.4. Escenario 4

La Tabla 38 indica la cantidad de vehículos según categoría y tipo de motorización del Escenario 4.

Tabla 38. Número de vehículos (Escenario 4)

Tipo de vehículos	Motor	Cantidad
VLM	Gasolina	8.105.887
VLM	Diésel	2.961.321
VLM	Eléctrico	1.735
VLM	Híbrido	8.469
Colectivo	Gasolina	144.147
Colectivo	Diésel	52.661
Colectivo	GLP	11.928
Motos	Gasolina	489.116
Buses	Diésel	218.871
Buses	Eléctrico	1.837
Camiones	Diésel	503.974
Camiones	Eléctrico	54

Fuente: elaboración propia

Tabla 39. Emisiones CO_2, CH_4 y N_2O (Escenario 4)

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones CO_2 ($ktCO_2$/año)	Emisiones CH_4 ($ktCH_4$/año)	Emisiones N_2O (ktN_2O/año)
VLM	Gasolina	12.633,45	4,56	1,46
VLM	Diésel	4.935,06	0,26	0,26
VLM	Híbridos	7,37	0,00	0,00
Colectivo	Gasolina	539,19	0,19	0,06
Colectivo	Diésel	210,62	0,01	0,01
Colectivo	GLP	42,27	0,04	0,00
Motos	Gasolina	670,87	0,05	0,07
Buses	Diésel	11.166,07	0,59	0,59
Camiones	Diésel	8.779,70	0,46	0,46
Emisiones totales		38.984,61	6,16	2,91

Fuente: elaboración propia

Las emisiones de los vehículos que utilizan combustible son 40.006,40 kilotoneladas de CO_2 equivalente (ver Tabla 39).

Variación de vehículos GLP:

Tabla 40. Variación de vehículos con GLP (Escenario 4)

Variación	+0%	+20%	+40%	+60%	+80%	+100%
Porcentaje del parque	6,00%	7%	8%	10%	11%	12%
Emisiones vehículos colectivos ($ktCO_2eq$/año)	819,86	819,19	818,52	817,18	816,51	815,84

Fuente: elaboración propia

En el Anexo 5.4 se encuentra más detalle de los resultados del Escenario 4.

4.2.5. Superación de metas

Se calculan las emisiones del parque vehicular en circunstancias donde las metas más ambiciosas planteadas son superadas. La Tabla 41 muestra el punto de inicio de electromovilidad (58% como el Escenario 1), el aumento en intervalos de 10% y las emisiones emitidas cuando la matriz eléctrica genera cero emisiones para un parque con híbridos y sin ellos.

Tabla 41. Aumento de electromovilidad con vehículos totalmente eléctricos.

Electromovilidad VLM (%)	Emisiones (kt CO_2 eq/año)	
100% BEV	**100% BEV**	**60% BEV, 40% HEV**
58%	10.610,78	13.224,12
68%	8.705,05	11.768,96
78%	6.791,48	10.305,96
88%	4.877,91	8.842,96
98%	2.972,17	7.387,80

Fuente: elaboración propia

5. Análisis de resultados

5.1. Análisis 2021

La cantidad de emisiones obtenidas muestra un aumento de un 11,33% con lo calculado por INGEI en el 2020 para el año 2018. Considerando que las emisiones históricas muestran una constante alza esto es esperado. Sin embargo, al calcular las emisiones del 2018 con el parque de aquel año, pero con el modelo de este informe, se obtiene una diferencia de un 3% con lo obtenido por INGEI, siendo las emisiones de este último menor. La diferencia puede ser causada por el uso de diferentes rendimientos o diferentes kilómetros recorridos. También, se analizó la incertidumbre del modelo usando el volumen de gasolina vendida en el año 2021 (Anexo 6). Se obtiene que el volumen de bencina obtenida en los cálculos es un 11,7% mayor que la vendida y, si se utiliza el valor de venta reemplazando el volumen obtenido con rendimientos y recorridos, las emisiones obtenidas se reducen un 4,98%. Por este motivo, se considera que el modelo podría tener una sobre estimación de un 3 a un 5%.

Los resultados del 2021 muestran que casi la totalidad de las emisiones provienen de vehículos que funcionan con combustibles fósiles. Vehículos livianos y medianos a gasolina emiten grandes cantidades de gases debido a su gran participación en el parque automotor, sus emisiones corresponden a un 43,58% del total. A éstos, le siguen buses con un 19,85%, VLM a diésel con un 16,60% y camiones con un 15,61%. Camiones y buses, a pesar de ser un porcentaje menor del parque vehicular, son causantes de gran parte de las emisiones debido a su alto consumo de combustible por su bajo rendimiento, por este motivo se puede observar que sus emisiones son mayores cuando se comparan los kilogramos de GEI emitidos por vehículo al recorrer un kilómetro (ver Tabla 42). Por último, hay que tener en cuenta que un automóvil puede transportar menos personas que un bus, por lo que considerando ambos con una capacidad completa, los buses causarían menor cantidad de emisiones por persona transportada, demostrando la importancia del uso transporte público en la reducción de emisiones.

Tabla 42. Porcentaje de emisiones y kilogramos de GEI emitidos por vehículo al recorrer un kilómetro.

Vehículos		Porcentaje de las emisiones	kg GEI por km por vehículo	Capacidad (personas)	kg GEI por persona
VLM	Gasolina	43,58%	0,15	5	0,03
	Diésel	16,60%	0,16	5	0,03
	Híbrido	0,04%	0,12	5	0,02
	Eléctrico	0,00%	0,06	5	0,01
Colectivo	Gasolina	1,86%	0,15	4	0,04
	Diésel	0,71%	0,16	4	0,04
	GLP	0,12%	0,12	4	0,03
Moto	Gasolina	1,52%	0,10	2	0,05
Bus	Diésel	19,85%	0,96	40	0,02
	Eléctrico	0,10%	0,60	40	0,02
Camión	Diésel	15,61%	0,72	-	-
	Eléctrico	0,00%	0,42	-	-

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, habiéndose obtenido que en el año 2021 se emitieron 27.387,57 kilo toneladas de CO_2 equivalente, las emisiones deben ser menores a 16.432,54 kt CO_2 equivalente para que se pueda considerar que el escenario crea una reducción significativa.

5.2. Análisis escenarios 2050

Luego de calcular, se obtiene que aquellos escenarios con mayor cantidad de vehículos con combustibles convencionales presentan mayores emisiones que aquellos donde hay mayor porcentaje de vehículos eléctricos (ver Tabla 43).

Tabla 43. Resultados escenarios 1, 2, 3 y 4.

Escenario	Emisiones combustibles ($ktCO_2$ eq)	Emisiones totales (kt CO_2 equivalente)		
		FE 2021	20% FE 2021	Matriz cero emisiones
OP 1	10.610,78	30.252,89	14.539,21	10.610,78
OP 2	14.052,08	31.091,85	17.460,03	14.052,08
PE 3	31.211,30	37.319,93	32.433,03	31.211,30
PE 4	40.006,40	40.070,72	40.019,26	40.006,40

Fuente: elaboración propia

El Escenario 1 es aquel que tiene menor emisiones, seguido por el Escenario 2. Estos resultados son esperados al ser los escenarios con mayor integración de electromovilidad,

Al comparar los valores obtenidos con aquellos del 2021 se puede observar que los escenarios 1 y 2 logran disminuir las emisiones en 61,26% y en un 48,69% un respectivamente, cuando se cumple además la meta de cero emisiones en la matriz eléctrica. La disminución aún se consigue en el caso que el factor de emisión sea un 20% del actual. Sin embargo, si se busca disminuir las emisiones del transporte terrestre en al menos un 40%, el Escenario 2 deja de ser exitoso. Si se mantienen las emisiones del sector eléctrico o no disminuyen lo suficiente, las emisiones aumentan incluso en los escenarios optimistas, dificultando el logro de la carbono neutralidad.

La Tabla 44 muestra la variación porcentual de las emisiones de los escenarios planteados con lo obtenido en el año 2021 considerando tres matrices eléctricas con diferentes emisiones.

Tabla 44. Variación de emisiones comparadas con 2021

Escenario	Variación emisiones totales (%)		
	FE 2021	20% FE 2021	Matriz cero emisiones
1	10,46	-46,91	-61,26
2	13,53	-36,25	-48,69
3	36,27	18,42	13,96
4	46,31	46,12	46,08

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que el Escenario 3, donde se proyecta en función de las medidas actuales, no se consigue reducir las emisiones versus el año 2021. Respecto el Escenario 4, donde se mantiene las condiciones actuales con el número futuro de vehículos, las emisiones aumentan en un 46,08% con una matriz eléctrica sin emisiones.

Es importante recordar que en los escenarios 2050 los rendimientos son mayores que en el 2021 para los vehículos livianos y medianos, tanto privados como colectivos, lo que disminuye el consumo de combustibles en un 47% por vehículo causando un efecto positivo en la disminución de emisiones.

5.2.1. Uso de vehículos híbridos

A pesar de que los vehículos híbridos estén dentro de la categoría de vehículos eléctricos, la cantidad de emisiones que producen comparados con un vehículo totalmente eléctrico es diferente. Se obtiene que los escenarios originales producen menos emisiones que su respectivo subescenario.

Tabla 45. Emisiones vehículos escenarios con híbridos

Escenario	Emisiones totales ($ktCO_2$ eq)			Variación (%)		
	FE 2021	20% FE	Matriz cero emisiones	FE 2021	20% FE	Matriz cero emisiones
1.1	17.557,36	16.735,59	13.224,12	12,39	-38,89	-51,71
2.1	31.456,16	18.974,56	15.854,15	14,86	-30,72	-42,11

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 45 se observa que, considerando una matriz cero emisiones, en ambos escenarios se logra disminuir las emisiones de manera significativa. Esto deja de ser así si el factor de emisión de la matriz es disminuido en menos de un 80%.

Es interesante observar que el Escenario 1.1 es más eficaz en la reducción de emisiones que el Escenario 2, mostrando así lo valioso que es tener un mayor porcentaje de electromovilidad independiente que incluya algunos vehículos híbridos. El subescenario se mantiene favorable hasta un 50% por ciento de vehículos híbridos, luego de eso, las posiciones se alternan volviendo el Escenario 2 más eficiente.

Respecto a la variación de híbridos dentro de los escenarios 1 y 2, se observa que en el primero de éstos se permite casi un 90% de híbridos y un 10% de eléctricos puros para que la reducción de emisiones sea igual a un 40%. Debido a que actualmente el porcentaje de híbridos es un 83%, se induce que, si el comportamiento dentro de los vehículos eléctricos se mantiene, aún se podría alcanzar una reducción significativa con el Escenario 1. No así con el Escenario 2, donde el porcentaje de híbridos no podría pasar de un 50%. Esto se puede observar en la Figura 2 donde se indica con una línea roja la emisión máxima que debería tener el parque automotor.

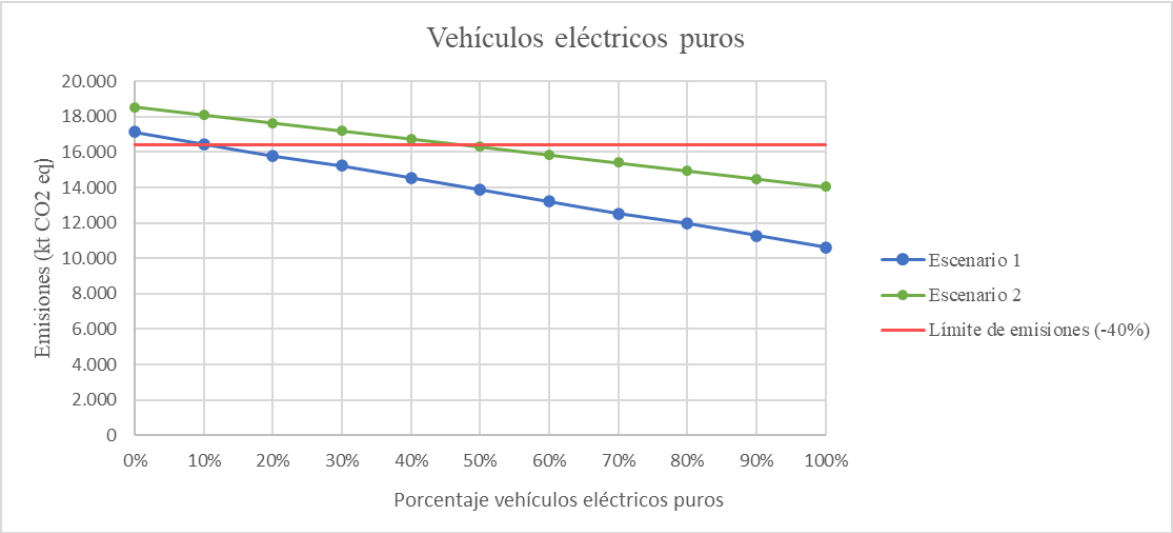

Figura 2. Variación de vehículos eléctricos e híbridos

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que el efecto de tener un mayor número de híbridos puede cambiar de acuerdo con las emisiones de la matriz eléctrica. A mayor factor de emisión, menor es la diferencia de tener solo vehículos híbridos o solo vehículos a batería. Por ejemplo, en el Escenario 1, si se tiene solo vehículos eléctricos con la matriz eléctrica actual las emisiones son un 2,29% menores que tener solo vehículos híbridos, mientras que al tener una matriz eléctrica sin emisiones se incrementan los beneficios de tener solamente autos eléctricos, teniendo esta vez una diferencia de 38,11%.

Es importante mencionar que, debido a la gran cantidad de vehículos híbridos y sus distintas posiciones en el espectro de la electromovilidad, es que es inexacto hablar de un híbrido promedio que tenga un rendimiento que represente a todos estos tipos de vehículos.

Por lo tanto, los resultados de este análisis pueden variar dependiendo del grado de autonomía eléctrica del auto. Por ejemplo, el uso de vehículos híbridos con un rendimiento eléctrico mucho menor a 7.500 kilómetros puede acentuar la diferencia entre utilizar autos totalmente eléctricos e híbridos.

Se concluye que es importante fomentar la preferencia de vehículos eléctricos puros para disminuir al máximo las emisiones, sin embargo, el uso de vehículos híbridos puede ser un gran apoyo para alcanzar altos porcentajes de electromovilidad.

5.2.2. Variación de matriz eléctrica

Los resultados muestran que las emisiones de cada escenario son afectadas de manera distinta por las variaciones de la matriz eléctrica.

En los escenarios optimistas, debido a la mayor introducción de vehículos eléctricos y por lo tanto mayor dependencia en la matriz, se observa que una variación negativa del factor de emisión, es decir su disminución, produce una reducción proporcional de las emisiones. De la misma forma, mientras aumenta el factor de emisión, las emisiones también se ven incrementadas. Asimismo, se puede observar en la Figura 3 que a mayor proporción de vehículos eléctricos mayor es la pendiente de las rectas, mostrando así que esos escenarios se ven más afectados por la variación. A su vez, los escenarios pesimistas no se ven tan afectados por la composición de la matriz eléctrica, lo que se explica por su falta de dependencia. Sin embargo, en el Escenario 3 una limpieza de la matriz eléctrica sí tendría una consecuencia positiva al tener una cantidad relevante de vehículos eléctricos.

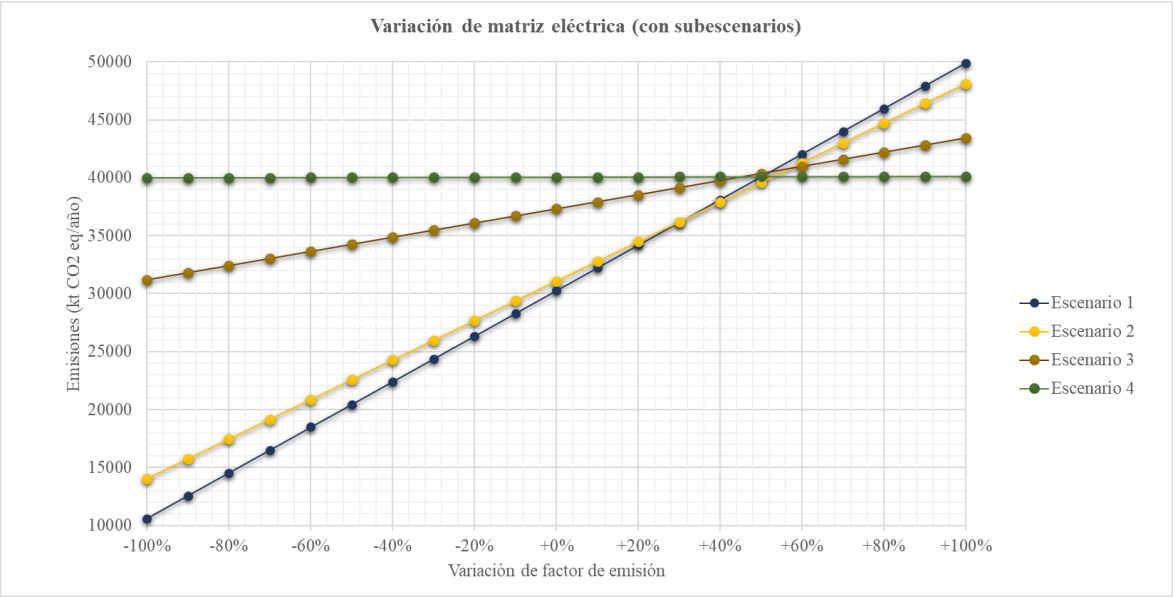

Figura 3. Variación de matriz eléctrica

Fuente: elaboración propia

La Figura 3 muestra, también, como tener diferentes factores de emisión de la matriz eléctrica causan que la preferencia ante un escenario cambie. Como se mencionó anteriormente el Escenario 1 tiene una menor cantidad de emisiones, pero, ante un factor de emisión un 30% más alto, el Escenario 2 presenta menos emisiones. E incluso, cuando el factor de emisión de la matriz eléctrica aumenta en un 50%, las emisiones provocadas para generar la electricidad son tan altas que el Escenario 4 se vuele el más favorable.

Al comparar los escenarios optimistas con sus subescenarios se ve que sus comportamientos son similares y que una variación mayor a un +30% alterna la eficacia de reducción de emisiones (ver Figura 4).

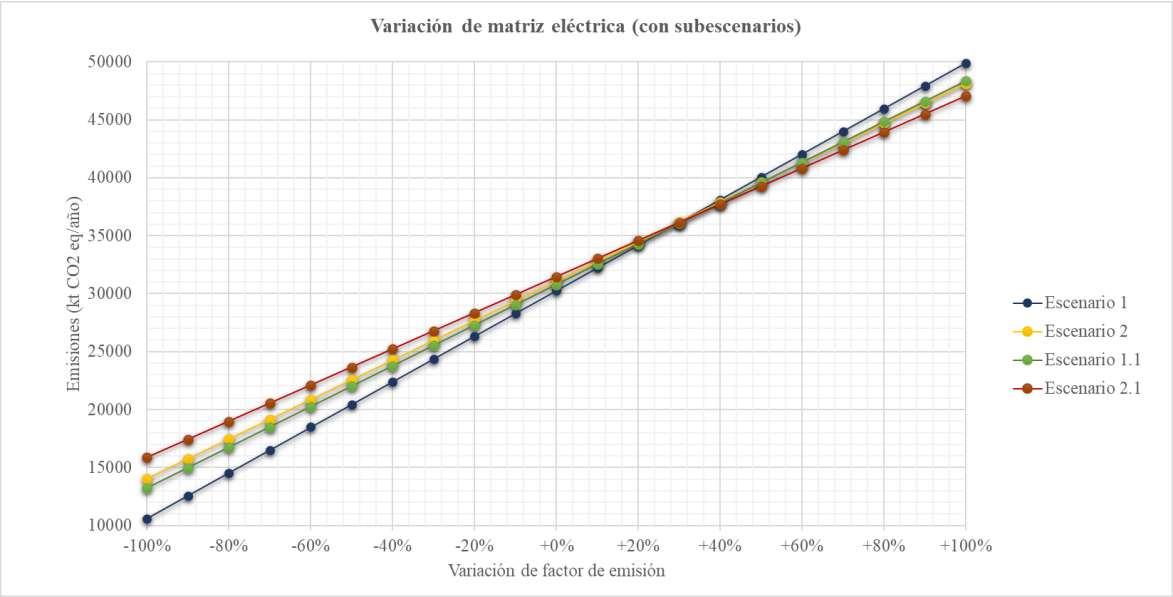

Figura 4. Variación de matriz eléctrica (escenarios 1, 2, 1.1, 2.1)

Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Camiones a Hidrógeno y Camiones eléctricos

Cuando el 71% de los camiones del Escenario 1 funciona con electricidad, se requieren de 9.150.778,42 MWh al año para satisfacer su consumo. Si estos funcionan con hidrógeno el requerimiento aumenta considerablemente alcanzando los 54.904.670,50 MWh al año (ver Figura 5).

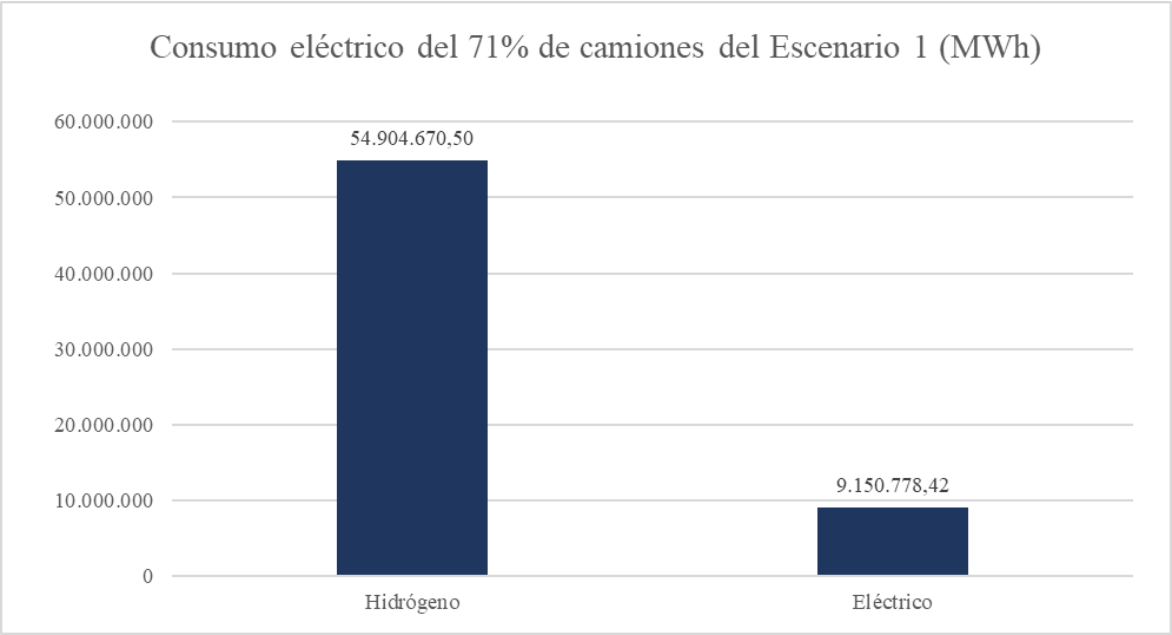

Figura 5. Comparación consumo eléctrico de camiones a hidrógeno y camiones totalmente eléctricos

Fuente: elaboración propia

Esta gran diferencia se da porque, a pesar de que el uso de hidrógeno pueda tener buena reputación al no emitir emisiones en su uso y al ser una alternativa a los combustibles fósiles, actualmente en Chile crear un kilogramo de hidrógeno requiere mucha energía eléctrica. Por lo que se puede decir que los beneficios ambientales de camiones a hidrógeno, según sus rendimientos y requerimientos actuales, dependen en gran grado de las emisiones al generar electricidad, por lo que, en una matriz eléctrica dominada por energías no renovables, no serían la mejor alternativa para ser usados al compararlos con los camiones eléctricos con mayores rendimientos. En la Figura 6 se muestra la diferencia en emisiones entre usar una u otra alternativa con diferentes factores de emisión de la matriz eléctrica.

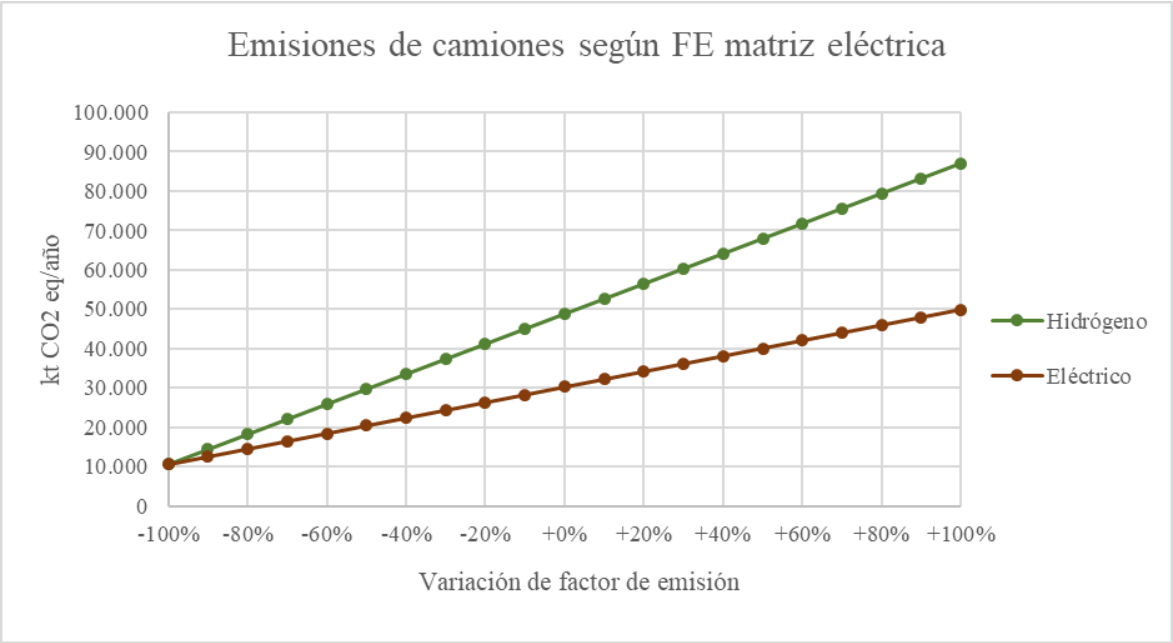

Figura 6. Uso de camiones a hidrógeno o eléctrico con diferentes factores de emisión de la matriz eléctrica.

Fuente: elaboración propia.

A su vez, si el hidrógeno proviene de energías limpias y efectivamente es "verde" su uso puede ayudar a la baja de emisiones, ya que puede ser una de las soluciones al problema de los largos tiempos de carga ya que, como fue mencionado anteriormente, mientras un vehículo eléctrico normal puede tomar horas en cargar, el repostaje de hidrógeno demora igual que en los combustibles comúnmente usados, lo que es especialmente relevante para vehículos pesados. Además, la alta autonomía de camiones a hidrógeno podría permitir que estos hagan viajes largos sin necesidad de repostar.

Otro factor para examinar es la baja eficiencia que tienen los vehículos con celdas de hidrógenos, causada principalmente por las pérdidas energéticas al convertir hidrógeno en electricidad, siendo su eficiencia general igual a un 30% mientras que las de vehículos eléctricos es de un 77% (ver Anexo 7). Incluso no emitiendo emisiones al generar electricidad, la matriz eléctrica presentará mayor presión en los próximos años y para asegurar que pueda responder a esta mayor demanda, es importante disminuir al máximo la pérdida de energía.

También hay que considerar que para generar hidrógeno se requiere de agua para la electrólisis. Para que un camión recorra cien kilómetros se necesitan 11 kilogramos de

hidrógeno los que se generan con 110 litros de agua, un gasto hídrico que no tienen los camiones eléctricos.

Cabe mencionar que el uso de hidrógeno sigue siendo investigada y desarrollada, por lo que actualmente hay diferentes variedades de vehículos de este tipo y, al mismo tiempo, es muy probable que para el año 2050 existan cambios en su sistema.

En caso de que Chile se convierta en un gran productor de hidrógeno verde y logre integrarlo a la matriz energética, en transporte específicamente, hacerlo en camiones parece indicado considerando que la instalación del sistema de hidrógeno requiere de espacio, lo que se imposibilita en vehículos pequeños. También, los avances en hidrógeno verde tienen que ser acompañados con instalación de varios puntos de repostajes para evitar dificultades para usuarios.

Por último, es importante mencionar que el uso de camiones a hidrógeno y de camiones eléctricos no tiene por qué ser excluyente, ya que entre ambos pueden dar alternativas que faciliten la preferencia a vehículos sin emisiones.

5.2.4. Uso de gas licuado de petróleo

En el Escenario 3 se analizó la inclusión de un 21% de colectivos a GLP los que se utilizaron para reemplazar (en diferentes situaciones) colectivos eléctricos, a diésel y a gasolina. Considerando las emisiones de colectivos en su estado original y con sus modificaciones, se obtiene que la menor cantidad de emisiones se producen cuando el diésel es reemplazado, a su vez las emisiones son mayores cuando se reemplaza los vehículos eléctricos (ver Tabla 46). Sin embargo, la diferencia es pequeña incluso en el caso del diésel y se hace aún menor al comparar el escenario total, por lo que los vehículos a GLP no son una buena alternativa para disminuir emisiones de manera sustancial.

Tabla 46. Emisiones y variación por uso de GLP

		Emisiones de colectivos ($ktCO_2$ eq)	Variación emisiones colectivos (%)
Escenario 3 original		650,87	-
GLP reemplaza:	Eléctricos	809,81	24,42
	Diésel	631,46	-2,98
	Gasolina	638,68	-1,87

Fuente: elaboración propia

La conclusión anterior también es observada en el análisis del Escenario 4 donde a pesar de que el aumento de colectivos con GLP al doble de la cantidad inicial, la disminución de las emisiones es de 53,47 kilo toneladas lo cual no es significativo comparado con las emisiones totales.

5.2.5. Éxito y superación de metas

En el año 2021 el aumento de vehículos eléctricos (híbridos y a batería) fue de un 101,9% con respecto al año anterior, mayor al de cualquier otro tipo de motorización, pero ¿será suficiente para alcanzar los objetivos de electromovilidad?

Además de las proyecciones usadas para hacer el Escenario 3, hay diversas estimaciones para el parque automotor de los siguientes 28 años, por ejemplo: proyecciones del Coordinador Eléctrico Nacional estiman que para el año 2040 habría un millón de vehículos eléctricos livianos funcionando en Chile (Electromov, 2020), a su vez, Engie proyecta que para el 2030 habría 500 mil vehículos eléctricos, dos millones en 2040 y en el 2050 la cifra alcanzaría los cinco millones (Electromov, 2019); esto mientras AVEC estima solo 14 mil vehículos livianos para el 2030 (Montoya, 2021), finalmente USACH proyecta 3,9 millones de vehículos eléctricos al 2050 (Electromov, 2021).

Los factores que puedan afectar al éxito o al fracaso de las metas y, por lo tanto, que definan qué escenario tiene una mayor probabilidad de volverse realidad, son muy variados. Como se mencionó anteriormente, varios países han aumentado la venta de vehículos eléctricos considerablemente en los últimos años gracias a incentivos económicos y de conveniencia. Los autos eléctricos en Noruega pasaron de ser un 1,5% de las ventas a

representar un 86,4% de las mismas en 10 años. Considerando que en Chile en septiembre del 2022 los autos eléctricos representan un 1,4% de las ventas se puede decir que si sigue el comportamiento del país europeo está a tiempo para asegurar que el 100% de los autos nuevos vendidos en el año 2035 sean de este tipo, aunque tendría que hacer un esfuerzo extra para que sean solamente cero emisiones, ya que los valores de Noruega incluyen híbridos. Alcanzar la meta del 2035 es de suma importancia para lograr alcanzar los escenarios más optimistas ya que considerando las ventas anuales de Chile en 15 años se podrían vender alrededor de 5,04 millones de vehículos eléctricos, un 40% del parque supuesto (Anexo 10). Sin embargo, las medidas económicas tomadas no han sido significativas para promover la compra de vehículos eléctricos particulares en el grueso de la población, lo que puede impactar negativamente a la rapidez con la que se aumenta el número de vehículos de este tipo. De igual forma, se puede observar que en Noruega el aumento sólo se aceleró cuando el precio de vehículos convencionales alcanzó el de los eléctricos, a pesar de ya contar con los incentivos desde 20 años antes. Esto hace esencial la disminución de los precios de los vehículos eléctricos y/o una subvención a la compra de éstos. Cabe destacar que la disminución del precio de estas tecnologías se ha logrado gracias a que ahora las baterías son más baratas, aun así, los precios no han bajado de la manera esperada debido principalmente a la inflación y a el hecho de que algunas marcas se han inclinado a hacer autos eléctricos de lujo (ver Anexo 9). La inflación no solo ha afectado a los vehículos eléctricos, sino que también ha aumentado los precios de todo tipo de vehículos, lo que ha provocado una disminución de ventas en general, ocasionando que las personas prefieran vehículos de segunda mano o simplemente elijan mantener su vehículo actual más años de lo usual, lo que complicaría la transformación del parque automotor (ver Anexo 8). Al mismo tiempo, el aumento de precios acerca los valores de vehículos convencionales y eléctricos, además que sube el costo de combustible, siendo un punto favorable para la venta de vehículos eléctricos.

Por todo lo mencionado anteriormente, resulta difícil asegurar el porcentaje de vehículos eléctricos para el 2050, aún más considerando la pandemia o tensiones internacionales, que traen incertidumbre y cambios en el contexto nacional y global. Sin embargo, si Chile sigue las tendencias mundiales debería alejarse del escenario más pesimista.

Cabe destacar que, en cuanto vehículos de transporte público urbano, se tienen mejores expectativas con respecto a la integración de vehículos eléctricos debido a las medidas ya tomadas dentro del sector, además de que mundialmente la electrificación de buses está más avanzada. Lo contrario pasa con camiones, donde se proyecta una lenta electrificación al tener aún desafíos tecnológicos.

Es importante tener en cuenta que el rápido crecimiento de la electromovilidad debe verse acompañado por un aumento de la Infraestructura de Recarga para Vehículos Eléctricos (IRVE) para que esto no se vuelva un limitante. Se estima que se debería contar con al menos 20 mil puntos de carga para el 2030, y 130 mil puntos de carga para el 2050 (si se alcanzan 5 millones de vehículos eléctricos) (Electromov, 2021). Considerando que se espera tener alrededor de dos mil para el 2024, se requiere de mayor inversión en el área.

Por último, la Tabla 47 muestra como es la reducción de GEI con distintos porcentajes de electromovilidad en el caso que se superen las metas respecto a los vehículos livianos y medianos. Las emisiones remanentes corresponden al 29% de los vehículos de carga.

Tabla 47. Superación de metas de electromovilidad VLM y su reducción de emisiones.

Electromovilidad VLM	Reducción de emisiones vs 2021	
	100% BEV	**60% BEV, 40% HEV**
58%	61,26%	51,71%
68%	68,22%	57,03%
78%	75,20%	62,37%
88%	82,19%	67,71%
98%	89,15%	73,02%

Fuente: elaboración propia

Con respecto a la matriz eléctrica, como se mencionó en el capítulo “Política y proyecciones sobre fuentes de energía”, en el año 2020 se alcanzó la participación de energías renovables proyectadas para el 2025, permitiendo adelantar objetivos energéticos. Además, entre agosto del 2021 y septiembre del 2022, las energías eólica y solar generaron más electricidad que el carbón con un 27,5% y un 26,5% respectivamente, siendo esto un hecho sin precedentes en Chile. A esto se le suma el hecho que el aumento de estas generadoras renovables ha permitido disminuir las emisiones del sector eléctrico en un 6%

entre los años 2016 y 2021, mientras que la demanda aumentaba un 11% en este mismo periodo (Bruce-Lockhart & Fulghum, 2022). Por lo que se puede decir que la matriz eléctrica va bien encaminada para lograr el cierre de las termoeléctricas a carbón y su sustitución por energías renovables no convencionales.

6. Conclusión

Se identifica que el parque vehicular chileno del año 2021 cuenta con 5.980.693 vehículos motorizados, con un 88% de estos siendo vehículos livianos y medianos particulares. Se utiliza gasolina y diésel como combustible de transporte con un 73,10% y un 26,71%, respectivamente, también se pueden encontrar vehículos a gas (principalmente licuado de petróleo) y vehículos eléctricos, ambos en un 0,1%.

Los vehículos eléctricos, ya sean puros, híbridos o a hidrógeno representan la tecnología emergente más relevante debido a que se espera que un gran porcentaje de vehículos de este tipo ayuden a lograr la carbono neutralidad. Sin embargo, las ventas de estos vehículos solo representan un 1,4% de las ventas en el 2022.

Para el 2050 se considera un parque de 12,5 millones de vehículos y se plantean cuatro escenarios con diferentes porcentajes de electromovilidad. En los escenarios 1 y 2 se cumplen las metas de transporte para lograr ser carbono neutral, es decir transporte público urbano totalmente eléctrico al igual que el 71% de los camiones. En lo que respecta vehículos particulares, el Escenario 1 tiene un 58% de electromovilidad y el Escenario 2 cuenta con un 40% de vehículos eléctricos. El escenario 3 tiene menores porcentajes de vehículos eléctricos y se plantea según proyecciones de la NDC y IEA considerando las medidas tomadas actualmente. El escenario 4 tiene el menor porcentaje de electromovilidad ya que mantiene la composición del 2021.

Para el cálculo de la huella se utilizan los factores de emisión estándares de las *Directrices de IPCC del 2006*, tanto para dióxido de carbono como para metano y óxido nitroso.

Al calcular la huella de carbono se obtiene que en el 2021 se emiten 27.387,57 kt CO_2 equivalente. Con una matriz eléctrica cero emisiones, en el año 2050 el parque emitiría lo siguiente: 10.610,78 kt CO_2 eq. en el Escenario 1, 14.052,08 kt CO_2 eq. en el Escenario 2, 31.211,30 kt CO_2 eq. en el Escenario 3 y 40.006,40 kt CO_2 eq. en el Escenario 4.

Contrastando los resultados del año 2021 con los del 2050, se obtiene una disminución de emisiones en los escenarios 1 y 2 con un descenso de 61,26% y de 48,69% respectivamente. Se obtiene que el Escenario 3 no logra una disminución de GEI y que el Escenario 4 presenta un aumento de emisiones de un 46,08%, lo que acentúa la importancia de transformar el transporte terrestre actual considerando el crecimiento que se espera en el sector.

Analizando los resultados, se concluye que la mejor forma de disminuir las emisiones es fomentar la integración de vehículos eléctricos, ya que el uso de combustibles fósiles emite la mayor cantidad de emisiones. Considerando una reducción de emisiones mayor al 40% como relevante, se puede decir que los escenarios 1 y 2 ayudarían a alcanzar la carbono neutralidad, sin embargo, el Escenario 1 es el que más aporta al objetivo. Si el escenario 1 tiene un 40% de híbridos dentro de su electromovilidad sigue siendo el más eficaz, aunque reduce su reducción de emisiones, mostrando que, aunque es preferible el uso de vehículos totalmente eléctricos, los híbridos pueden ser un buen apoyo para lograr un porcentaje de electromovilidad mayor.

Se debe destacar que en el caso que el factor de emisión de la matriz eléctrica no sean cero, los escenarios más afectados son aquellos con mayor electromovilidad, atenuando la disminución de emisiones. Ante grandes aumentos del factor de emisión (más de un 30%) los escenarios con menos electromovilidad se vuelven los de menores emisiones. A raíz de esto, se deduce que el cambio dentro del parque vehicular debe ser acompañado por la reducción de las emisiones de la matriz eléctrica. Por lo que es importante trabajar hacia ambas metas de manera paralela.

En cuanto al uso de hidrógeno como combustible para camiones, se concluye que en cuanto a la disminución de emisiones es una buena alternativa ya que no emite GEI al funcionar y mantiene los tiempos de repostaje de vehículos convencionales facilitando su uso, sin embargo, tiene un alto requerimiento eléctrico y muchas pérdidas de energía por lo que depende altamente de la composición y capacidad de las generadoras de electricidad.

Respecto al uso de gas licuado de petróleo se puede observar que, aunque disminuye levemente las emisiones, la reducción que causa no es relevante por lo que no se puede depender de su uso para alcanzar las metas de carbono neutralidad.

Finalmente, se recomienda seguir trabajando para alcanzar un alto porcentaje de vehículos eléctricos, especialmente BEV, junto con una red adecuada de carga o repostaje que facilite la transición para los usuarios. Se sugiere presentar incentivos económicos al menos hasta que el crecimiento de estos vehículos se consolide y centrando los esfuerzos en las ventas de los próximos años para así lograr la meta del año 2035, ya que de ella depende enormemente el estado del transporte para el año 2050.

7. Referencias

AGN. (s.f.). *Gas natural vehicular*. Obtenido de Asociación Gas Natural (AGN): https://www.agnchile.cl/gas-natural-vehicular/

Aguirre, B. (18 de Agosto de 2013). *Un auto a gas consume 40% menos que uno a gasolina y un híbrido, la mitad*. Obtenido de Economía y Negocios: http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=111571

ANAC. (Diciembre de 2021). *Informe del mercado automotor*. Obtenido de ANAC: https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2022/01/12-ANAC-Mercado-Automotor-Diciembre-2021.pdf

ANAC. (2022). *Informe de ventas de vehículos cero y bajas emisiones.* Santiago.

ANAC. (Enero de 2022). *Informe del mercado automotor*. Obtenido de ANAC: https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2022/02/01-ANAC-Mercado-Automotor-Enero-2022.pdf

ANSA. (10 de Julio de 2019). *Las ventajas de los autos a gas ahora están disponibles para todos*. Obtenido de ANSA automotriz: https://www.ansaautomotriz.cl/articulo-las-ventajas-los-autos-gas-ahora-estan-disponibles-todos/

Ares, H. (11 de Abril de 2021). *Coches de gas frente a coches eléctricos: estas son las armas que tiene cada tecnología para hacerse con el futuro de la automoción*. Obtenido de Xataka: https://www.xataka.com/automovil/coches-gas-frente-a-coches-electricos-estas-armas-que-tiene-cada-tecnologia-para-hacerse-futuro-automocion-1

Autovista. (12 de Septiembre de 2022). *Tables are turning – used-car markets down in 2022, recovery in 2023?* Obtenido de Autovista: https://autovista24.autovistagroup.com/news/europe-used-car-markets/

Autovista24. (16 de Diciembre de 2021). *Are e-fuels as green as they seem?* Obtenido de Autovista24: https://autovista24.autovistagroup.com/news/are-e-fuels-as-green-as-they-seem/

Basaure, F. (2021). *Evaluación de factibilidad técnica-económica de camiones eléctricos para uso en logística de última malla*. Obtenido de Universidad de Chile: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/180474/Evaluacion-de-factibilidad-tecnica-economica-de-camiones-electricos-para-uso-en-logistica-de-ultima-milla.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bruce-Lockhart, C., & Fulghum, N. (25 de Octubre de 2022). *La energía eólica y solar superan al carbón en Chile.* Obtenido de Chile sustentable: https://www.chilesustentable.net/2022/10/por-primera-vez-en-chile-la-energia-eolica-y-solar-superaron-la-generacion-a-carbon/

Car and Driver. (11 de Febrero de 2020). *Eléctricos, híbridos, diésel y gasolina: ¿cuántas emisiones producen en su vida útil?* Obtenido de Car and Driver: https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a30780438/emisiones-contaminantes-segun-tipo-coche/

Chile, G. d. (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente de Chile: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf

Comisión Nacional de Energía. (2022). *Venta combustibles líquidos*. Obtenido de Energía Abierta: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/combustibles-por-region/

CONAMA. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. Obtenido de RETC: https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/GUIA_CONAMA.pdf

Diálogo Chino. (28 de Junio de 2021). *El creciente mercado de autos eléctricos de América Latina*. Obtenido de Diálogo Chino: https://dialogochino.net/es/clima-y-energia-es/44044-el-creciente-mercado-de-autos-electricos-de-america-latina/

Díaz, B. (1 de 11 de 2022). *Los 20 coches eléctricos con más autonomía: ¿llegó la hora del cambio?* Obtenido de Car and Driver: https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/g35350195/vehiculos-electricos-autonomia/

Dr. Holland, M. (4 de Noviembre de 2022). *Norway's BEVs Still Growing Well, Even While PHEVs Fall Away*. Obtenido de CleanTechnica: https://cleantechnica.com/2022/11/03/norways-bevs-still-growing-well-even-while-phevs-fall-away/

Dr. Holland, M. (2 de Septiembre de 2022). *Sweden Plugin EV Share At 46.1% In August*. Obtenido de CleanTechnica: https://cleantechnica.com/2022/09/02/sweden-plugin-ev-share-at-46-1-in-august/

Dr. Zozaya, J. (30 de Septiembre de 2022). *La electromovilidad en México está más cerca con iniciativas integrales*. Obtenido de Forbes México: https://www.forbes.com.mx/la-electromovilidad-en-mexico-esta-mas-cerca-con-iniciativas-integrales/#:~:text=De%20enero%20a%20junio%20de,h%C3%ADbridos%20conectables%20y%2019%2C060%20h%C3%ADbridos.

Electromov. (Septiembre de 2019). *¿Cinco millones de vehículos eléctricos en Chile? Las proyecciones de Engie en electromovilidad*. Obtenido de Electromov.cl: https://www.electromov.cl/2019/09/06/cinco-millones-de-vehiculos-electricos-en-chile-las-proyecciones-de-engie-en-electromovilidad/

Electromov. (30 de Diciembre de 2020). *Proyectan 1.000.000 de vehículos eléctricos livianos circulando a 2040 en Chile*. Obtenido de Electromov.cl: https://www.electromov.cl/2020/12/30/proyectan-1-000-000-de-vehiculos-electricos-livianos-circulando-a-2040-en-chile/

Electromov. (Abril de 2021). *Estudio Usach: A 2050 se requerirán 130.000 puntos de recarga de vehículos eléctricos*. Obtenido de Electromov.cl: https://www.electromov.cl/2021/04/13/estudio-usach-a-2050-se-requeriran-130-000-puntos-de-recarga-de-vehiculos-electricos/

Enel. (s.f.). *1.200 cargadores para autos eléctricos unirán Chile de norte a sur*. Obtenido de Enel: https://www.enel.cl/es/conoce-enel/electromovilidad-a-fondo/1200-cargadores-para-autos-electricos-uniran-chile-de-norte-a-sur.html

Energía, M. d. (s.f.). *Transporte de pasajeros*. Obtenido de Plataforma de electromovilidad: https://energia.gob.cl/electromovilidad/transporte-de-pasajeros/buses-electricos-red

Fernández Munguía, S. (16 de Enero de 2020). *Camiones eléctricos: así son los planes de los principales fabricantes ante el reto de electrificar el transporte de mercancías por carretera*. Obtenido de Xataka: https://www.xataka.com/automovil/camiones-electricos-asi-planes-principales-fabricantes-reto-electrificar-transporte-mercancias-carretera

Fidalgo, R. (16 de Julio de 2020). *Cómo se mide el consumo en un coche eléctrico*. Obtenido de Autocasión: https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/como-se-mide-el-consumo-en-un-coche-electrico#:~:text=En%20la%20actualidad%2C%20un%20consumo,o%2015%20kWh%2F100%20km.

Flores, J. (23 de Agosto de 2017). *Chile tendrá casi 5 millones de autos eléctricos en 2050: el 40% del parque vehicular*. Obtenido de biobiochile.cl: https://www.biobiochile.cl/noticias/economia/actualidad-economica/2017/08/23/chile-tendra-casi-5-millones-de-autos-en-2050-el-40-del-parque-vehicular.shtml

Font, L. (17 de Noviembre de 2013). *¿Cuantos kilómetros haces en moto al año? La pregunta de la semana*. Obtenido de Motorpasión: https://www.motorpasionmoto.com/motorpasion-moto/cuantos-kilometros-haces-en-moto-al-ano-la-pregunta-de-la-semana

Frey, R. (Mayo de 2022). *Autos nuevos de GLP en Chile en Mayo 2022*. Obtenido de glpautogas.info: https://www.glpautogas.info/es-cl/autos-gas-glp-chile.html

Frey, R. (s.f.). *Como funcionan los automoviles con Bio Etanol E85*. Obtenido de glpautogas.info: https://www.glpautogas.info/es/como-funcionan-coches-carros-autos-bioetanol-e85-flexifuel.html

García Bernal, N. (Mayo de 2019). *Electromovilidad*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile:

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27343/1/BCN__Electromovilidad_Experiencias_comparadas_.pdf

García Bernal, N. (Septiembre de 2021). *Matriz energética y eléctrica en Chile*. Obtenido de Biblioteca Congreso Nacional de Chile: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf

García, G. (15 de Diciembre de 2018). *Tipos de vehículos eléctricos: funcionamiento y características de cada tecnología*. Obtenido de Híbridos y Eléctricos: https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/asi-funcionan-diferentes-tecnologias-vehiculos-electricos/20180921203150021994.html

Gasco. (s.f.). *Conversión de Vehículo a Gas*. Obtenido de Gasco: https://www.gasco.cl/transporte/comoMeCambio/Conversiones#:~:text=Conversi%C3%B3n%20de%20Veh%C3%ADculo%20a%20Gas&text=La%20conversi%C3%B3n%20es%20una%20intervenci%C3%B3n,de%20combustible%20en%20el%20maletero.

Gatica, L., & Almazabar, D. (13 de Diciembre de 2021). *¿Cuánto cuesta un vehículo eléctrico en Chile?: Expertos entregan claves para conocer el valor de los modelos cero emisiones*. Obtenido de Emol: https://www.emol.com/noticias/Autos/2021/12/13/1041064/vehiculo-electrico-chile.html

Generadoras de Chile. (2020). *Reporte Anual 2020: Generación y usos de la energía eléctrica*. Obtenido de Generadoras: http://generadoras.cl/media/Reporte_Anual_2020_-Capitulo_4-_Generadoras_de_Chile.pdf

Generadoras de Chile. (Mayo de 2022). *Mercado eléctrico sector generación*. Obtenido de Generadoras de Chile: http://generadoras.cl/media/page-files/2073/Boletin-Mercado-Electrico-Generadoras-de-Chile-Mayo-2022.pdf

GHG Protocol. (Febrero de 2016). *Global Warming Potential Values*. Obtenido de Greenhouse Gas Protocol:

https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf

Gobierno de Chile. (2020). *Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile.*

Gobierno de Chile. (12 de Febrero de 2022). Fija estándar mínimo de eficiencia energética para vehículos motorizados livianos. *Diario Oficial*.

Godoy, G. (15 de Julio de 2021). *Más de 5,5 millones de permisos de circulación se entregaron en 2020*. Obtenido de INE: https://www.ine.cl/prensa/2021/07/15/m%C3%A1s-de-5-5-millones-de-permisos-de-circulaci%C3%B3n-se-entregaron-en-2020?msclkid=26703ba6aab611ecb67de0dfb4fa4d36

Gómez, J. L. (21 de Agosto de 2020). *Cargar un coche eléctrico: conceptos básicos y tipos de cargadores*. Obtenido de Diariomotor: Cargar un coche eléctrico: conceptos básicos y tipos de cargadores

González, C. (20 de Marzo de 2022). *Presencialidad y parque automotriz: Regiones registran aumento de tacos y ciudades serían 15 minutos más lentas*. Obtenido de Emol: https://www.emol.com/noticias/Nacional/2022/03/20/1055410/tacos-regiones-presencialidad-parque-automotriz.html

González, F. (2019). *Chile no es el país con más buses eléctricos después de China*. Obtenido de FastChecking: https://factchecking.cl/user-review/chile-no-es-el-pais-con-mas-buses-electricos/

Greenhouse Gas Protocol. (s.f.). *About us*. Obtenido de Greenhouse Gas Protocol: https://ghgprotocol.org/about-us

Greenmoto. (10 de Marzo de 2020). *¿Consume poco una moto eléctrica?* Obtenido de Greenmoto: https://www.greenmoto.es/blog/consumo-moto-electrica/

Guarino, L. (28 de Enero de 2022). *¿Cuál es el futuro de la movilidad eléctrica en América Latina?* Obtenido de Bloomberg Línea: https://www.bloomberglinea.com/2022/01/28/cual-es-el-futuro-de-la-movilidad-electrica-en-america-latina/

Gutiérrez V, M. (15 de Julio de 2015). *Chile encabeza ranking de uso de vehículo con promedio de 29 mil km recorridos al año*. Obtenido de Plataforma Urbana: https://www.plataformaurbana.cl/archive/2015/07/15/chile-encabeza-ranking-de-uso-de-vehiculo-con-promedio-de-29-mil-km-recorridos-al-ano/

Gutiérrez, A. (9 de Agosto de 2022). *Colombia consolida liderazgo en ventas de carros eléctricos en la región*. Obtenido de La República: https://www.larepublica.co/empresas/colombia-consolida-su-liderazgo-en-ventas-de-vehiculos-electricos-en-latinoamerica-3420386#:~:text=As%C3%AD%20lo%20reafirm%C3%B3%20el%20%C3%BAltimo,al%20mismo%20periodo%20de%202021.

Gutiérrez, M. (17 de Mayo de 2011). *Parque de vehículos motorizados en Chile aumentó 60% en los últimos diez años*. Obtenido de Economía y Negocios: http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=84737

Hansen, P. (25 de Febrero de 2022). *¿Cuánto diésel consume un camión en Chile? y ¿Cuánto puede ahorrar?* Obtenido de Webfleet: https://www.webfleet.com/es_cl/webfleet/blog/cuanto-diesel-consume-un-camion-en-chile-y-cuanto-puede-ahorrar/

Henley, J., & Ulven, E. (19 de Abril de 2020). *Norway and the A-ha moment that made electric cars the answer*. Obtenido de The Guardian: https://www.theguardian.com/environment/2020/apr/19/norway-and-the-a-ha-moment-that-made-electric-cars-the-answer

Ibáñez. (5 de Junio de 2011). *Nociones básicas sobre biocarburantes (bioetanol y biodiésel)*. Obtenido de Motor pasión: https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/nociones-basicas-sobre-biocarburantes-bioetanol-y-biodiesel

IEA. (2022). *Global EV Outlook 2022*. Obtenido de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: https://iea.blob.core.windows.net/assets/e0d2081d-487d-4818-8c59-69b638969f9e/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf

INE. (2019). *Boletín parque vehicular*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas (INE): https://regiones.ine.cl/documentos/default-source/region-ii/estadisticas-

r2/boletines-informativos/boletines-parque-vehicular/boletin-pv-2020.pdf?sfvrsn=69dfad4a_6

IPCC 2006. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Obtenido de Volumen 2: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf

ISCI. (17 de Marzo de 2021). *Parque de autos se acelera y rozará los 5,5 millones de unidades este año*. Obtenido de ISCI: https://isci.cl/parque-de-autos-se-acelera-y-rozara-los-55-millones-de-unidades-este-ano/?msclkid=26706419aab611ecb2d4299c5ad21377

Jenkins, L. (14 de Junio de 2022). *EVs could take off even faster than expected*. Obtenido de Protocol: https://www.protocol.com/bulletins/ev-adoptions-rosiest-forecast-yet

Kane, M. (8 de Septiembre de 2022). *UK: Plug-In Electric Car Sales Returned To Growth In August 2022*. Obtenido de InsideEVs: https://insideevs.com/news/608487/uk-plugin-electric-car-sales-august2022/

KIA. (s.f.). *¿Los coches eléctricos son más baratos de mantener?* Obtenido de KIA: https://www.kia.com/cl/discover-kia/ask/are-electric-cars-cheaper-to-maintain.html#:~:text=En%20promedio%2C%20cuesta%20aproximadamente%20la,una%20cantidad%20sustancial%20de%20dinero.

López, J. C. (3 de Diciembre de 2021). *La energía nuclear es la que menos CO2 emite en todo su ciclo de vida: esto es lo que asegura el último informe de Naciones Unidas*. Obtenido de Xataka: https://www.xataka.com/energia/energia-nuclear-que-co2-emite-todo-su-ciclo-vida-esto-que-asegura-ultimo-informe-naciones-unidas

LugEnergy. (s.f.). *Modos de recarga de vehículos eléctricos*. Obtenido de LugEnergy: https://www.lugenergy.com/modos-de-recarga-vehiculos-electricos/

Majdalani, J. (20 de Octubre de 2021). *¿Cuál es la velocidad media de un coche eléctrico? Todas sus claves*. Obtenido de Adslzone: https://www.adslzone.net/e-movilidad/coches/velocidad-media-coche-electrico/

Manzur, M. (9 de Marzo de 2022). *Más de 1.000 buses eléctricos se sumarán al sistema de transporte público entre este año e inicios de 2023: el sábado llega primer embarque*. Obtenido de La Tercera: https://www.latercera.com/nacional/noticia/mas-de-1000-buses-electricos-se-sumaran-al-sistema-de-transporte-publico-entre-este-ano-e-inicios-de-2023-el-sabado-llega-primer-embarque/L5ZMJR6ICRAXFCCYSM2GADNFWE/#:~:text=Tr%C3%A1nsito-,M%C3%A1s%20de%201.000%2

Mena Roa, M. (1 de Noviembre de 2021). *El (largo) camino hacia la neutralidad del carbono*. Obtenido de COP26 de Glasgow: https://es.statista.com/grafico/26091/paises-con-leyes-o-documentos-politicos-concretos-para-lograr-la-neutralidad-de-carbono/#:~:text=De%20los%20137%20pa%C3%ADses%20que,ley%20o%20documento%20pol%C3%ADtico%20concreto.

Mendoza Benavente, D. (2021). *Conferencia de prensa ANAC 2021*. Obtenido de ANAC: https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2022/01/Conferencia-de-prensa-resultados-2021.pdf

Mendoza, I. (11 de Febrero de 2022). *Un estudio señala el punto débil de la movilidad eléctrica en Europa: faltan 65 millones de puntos de recarga para 2035*. Obtenido de Motor pasión: https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/estudio-senala-punto-debil-movilidad-electrica-europa-faltan-65-millones-puntos-recarga-para-2035

Michael. (2022). *¿Cuál es el rendimiento promedio de una moto?* Obtenido de Vida de dos ruedas: https://gijonmotoweekend.com/bicicleta/cual-es-el-rendimiento-promedio-de-una-moto.html

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (26 de Octubre de 2021). *Ministerios de Medio Ambiente, Ciencia y Energía lanzan Estrategia Climática de Largo Plazo que fija el camino para ser carbono neutral*. Obtenido de Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación:

https://www.minciencia.gob.cl/noticias/ministerios-de-medio-ambiente-ciencia-y-energia-lanzan-estrategia-climatica-de-largo-plazo-que-fija-el-camino-para-ser-carbono-neutral/#:~:text=La%20ECLP%20establece%20las%20emisiones,por%20sus%20siglas%20en%20ingl%C

Ministerio de Energía . (2021). *Informe Balance Nacional de Energía 2019.* Santiago. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/2020_informe_anual_bne_2019.pdf

Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050.* Santiago.

Ministerio de Energía. (2019). *Hidrógeno*. Obtenido de Electromovilidad: https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/16.Hidr%C3%B3geno.pdf

Ministerio de Energía. (2020). *Carbono neutralidad en el sector de energía.*

Ministerio de Energía. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.* Santiago . Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

Ministerio de Energía. (Abril de 2020). *Metas y avances en electromovilidad en Chile*. Obtenido de Plataforma de Electromovilidad: https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias?page=2

Ministerio de Energía. (2020). *Países que eliminarán la venta de vehículos diésel y gasolina*. Obtenido de Plataforma de electromovilidad: https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias?page=2

Ministerio de Energía. (2021). *Factores de Emisión*. Obtenido de Energía abierta: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/

Ministerio de Energía. (2021). *Informe Técnico Preliminar para el Establecimiento de Estándar de Eficiencia Energética Vehicular de Vehículos Motorizados Livianos* . Santiago. Obtenido de

https://energia.gob.cl/sites/default/files/informetecnicopreliminar_ldv_men_final.pdf

Ministerio de Energía. (2022). *Estrategia Nacional de Electromovilidad 2021*. Santiago.

Ministerio de Energía. (2022). *Transición Energética de Chile, Política Energética Nacional*. Santiago: Barría.

Ministerio de Energía. (s.f.). *Proyecciones de vehículos eléctricos*. Obtenido de Plataforma de Electromovilidad: https://energia.gob.cl/electromovilidad/tendencias#:~:text=Al%202019%20la%20cifra%20alcanz%C3%B3,h%C3%ADbridos%20enchufables%20en%20el%20mundo.

Ministerio de Energía; CWEEL; AEE. (2020). *Curso hidrógeno por mujeres*. Obtenido de Ministerio de Energía: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/clase_1_hidrogeno_verde_mujer_-_bibliografia_preguntas_y_respuestas.pdf

Ministerio de Medio Ambiente; SNI. (2020). *Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018*. Santiago.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (14 de Enero de 2020). *Análisis de infraestructura de electrolineras en ciudades*. Obtenido de Upme: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Infografia2_Proyecciones_EVSE.pdf

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2012). *Decreto 55: Establece normas de emisión aplicables a vehículos motorizados pesados que indica*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8364

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (Diciembre de 2016). *Información de transporte urbano en ciudades de Chile*. Obtenido de Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones:

http://www.mtt.gob.cl/transporteurbano/Informe_actualizaci%C3%B3n_informacion_transporte_urbano_2010_2015Final.pdf

Montoya, A. (Febrero de 2021). *Electromovilidad en Chile 2020*. Obtenido de ASOCIACIÓN GREMIAL DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE CHILE (AVEC): https://www.avec.cl/wp-content/uploads/2021/03/Electromovilidad-en-Chile-2020.pdf

Moraga, J., & Alfaro, W. (2019). Acuerdos multilaterales para un desarrollo sustentable . *Chile forestal Conaf*, 9. Obtenido de Chile forestal: https://www.conaf.cl/cms/editorweb/chifo/CHIFO390.pdf

Moreno, L. A. (3 de Julio de 2019). *Chile: a la vanguardia contra el cambio climático*. Obtenido de El País: https://elpais.com/elpais/2019/07/02/planeta_futuro/1562080415_467529.html#:~:text=Para%20combatir%20la%20contaminaci%C3%B3n%20del,a%20bater%C3%ADas%20para%20el%202022.

Moreno, S. (1 de Julio de 2019). *Adiós a los coches eléctricos silenciosos: desde 2021 tendrán que hacer un poco de ruido*. Obtenido de El país: https://elpais.com/tecnologia/2019/07/01/actualidad/1561987987_076908.html

Muñoz, J. (07 de Agosto de 2018). *Ganacias versus costos en los trabajos de transporte*. Obtenido de Autofact: https://www.autofact.cl/blog/mi-auto/actividades/ganancias-uber-taxi-beat-cabify

Muñoz, J. (16 de Agosto de 2021). *Gas vehicular: ventas y costos del GLP*. Obtenido de Autofact: https://www.autofact.cl/blog/mi-auto/tecnologia/gas-vehicular

Murias, D. (22 de Julio de 2020). *El hidrógeno no tiene futuro como combustible de coches o camiones, según Transport & Environment: es muy poco eficiente*. Obtenido de Motorpasion: https://www.motorpasion.com/industria/hidrogeno-no-tiene-futuro-como-combustible-coches-camiones-transport-environment-muy-poco-eficiente

Nakouzi, G. (3 de Febrero de 2021). *Historia de los autos en Chile*. Obtenido de Mundo en Terreno: https://www.enterreno.com/blogs/historia-de-los-autos-en-chile

Ochoa, J. (29 de Septiembre de 2020). *Vehículos motorizados en circulación en Chile aumentaron en más de 2,5 millones en diez años*. Obtenido de Diario Concepción: https://www.diarioconcepcion.cl/economia/2020/09/29/vehiculos-motorizados-en-circulacion-en-chile-aumentaron-en-mas-de-25-millones-en-diez-anos.html

Otero, A. (15 de Enero de 2020). *El GLP es el combustible alternativo más usado del mundo, pero sus inconvenientes pueden ponérselo difícil en España*. Obtenido de Motor pasión: https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/coches-glp-combustible-alternativo-inconvenientes-espana

Otiniano Pulido, C. (23 de Marzo de 2021). *¿Un coche eléctrico es más caro que uno de gasolina? Depende*. Obtenido de Cincodías: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/03/17/companias/1615978777_392526.html

Planelles, M. (25 de Octubre de 2021). *Las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera marcan un récord pese a la pandemia*. Obtenido de El país: https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/cambio-climatico/2021-10-25/las-concentraciones-de-efecto-invernadero-en-la-atmosfera-marcan-un-nuevo-record-historico.html

Plötz, P., Moll, C., Bieker, G., Mock, P., & Li, Y. (2020). *Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles* . Beijing, Berlin, San Francisco, Sao Paulo, Washington.

Pontes, J. (21 de Agosto de 2022). *14% Of New Car Sales In Germany Fully Electric, & 26% Have A Plug*. Obtenido de Cleantechnica: https://cleantechnica.com/2022/08/21/14-of-new-car-sales-in-germany-fully-electric-26-have-a-plug/

Pontes, J. (24 de Octubre de 2022). *China Electric Car Sales — 26% Fully Electric, 35% Have A Plug*. Obtenido de CleanTechnica: https://cleantechnica.com/2022/10/24/china-electric-car-sales-35-share-of-auto-sales-in-september/

Portaluppi, A. (31 de Diciembre de 2021). *País por país, los números del 2021 en infraestructura de carga para vehículos eléctricos en Latinoamérica*. Obtenido de

Portal Movilidad: https://portalmovilidad.com/pais-por-pais-los-numeros-del-2021-en-infraestructura-de-carga-para-vehiculos-electricos-en-latinoamerica/

RACE. (6 de Septiembre de 2022). *Combustibles sintéticos y eFuel para motores de combustión*. Obtenido de RACE: https://www.race.es/combustibles-sinteticos-y-efuel-para-motores-de-combustion

Randall, C. (2 de Noviembre de 2022). *Norwegian EV sales back up from September*. Obtenido de Electrive: https://www.electrive.com/2022/11/02/norwegian-ev-sales-back-up-from-september/#:~:text=In%20September%202022%2C%20new%20registrations,of%20around%2015%20per%20cent.

Rastreator. (s.f.). *Ventajas y desventajas de los coches de gas*. Obtenido de Rastreator: https://coches.rastreator.com/informacion/coches-de-gas

Redondo, M. (12 de Mayo de 2021). *https://www.highmotor.com/asi-funciona-sistema-hibridacion-suave-48-voltios.html*. Obtenido de High Motor: https://www.highmotor.com/asi-funciona-sistema-hibridacion-suave-48-voltios.html

Revista Electricidad. (7 de Octubre de 2010). *Petrobras trae el biodiesel a Chile para incorporarlo a buses del Transantiago*. Obtenido de Electricidad: https://www.revistaei.cl/2010/10/07/petrobras-trae-el-biodiesel-a-chile-para-incorporarlo-a-buses-del-transantiago/#

Rivero, N. (4 de Mayo de 2022). *Why electric cars are getting pricier even as batteries get cheaper*. Obtenido de Quartz: https://qz.com/2161731/why-electric-cars-are-getting-pricier-while-batteries-get-cheaper

Rocha-Hoyos, J. C., Llanes-Cedeño, E. A., Celi-Ortega, S. F., & Peralta-Zurita, D. C. (Junio de 2019). *Efecto de la Adición de Biodiésel en el Rendimiento y la Opacidad de un Motor Diésel*. Obtenido de Información tecnológica, 30(3): https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000300137&lang=pt

Ruta 401. (s.f.). *¿Cómo funcionan los coches eléctricos y cuáles son sus características?* Obtenido de Loctite teroson: https://blog.reparacion-vehiculos.es/coches-electricos

San Juan, P. (15 de Octubre de 2021). *Gobierno fija meta de que al 2035 sólo se vendan autos eléctricos en Chile*. Obtenido de La Tercera: https://www.latercera.com/pulso/noticia/gobierno-lanza-estrategia-de-electromovilidad-que-busca-que-al-2035-solo-se-vendan-autos-electricos-en-chile/IEX77BBVDNFHJBELRBJLHQVPDA/

Servicio de Impuestos Internos. (7 de Mayo de 2021). *Preguntas frecuentes*. Obtenido de Servicio de Impuestos Internos: https://www.sii.cl/preguntas_frecuentes/tasac_fiscal_vehiculos/001_170_6638.htm#:~:text=Fecha%20de%20Actualizaci%C3%B3n%3A%2007%2F05%2F2021&text=El%20Decreto%20N%C2%B0%20211,de%20tres%20o%20menos%20ruedas.

Soto, J. L. (12 de Febrero de 2022). *Qué es el AdBlue y por qué lo necesitan los coches diésel*. Obtenido de El motor: https://motor.elpais.com/conducir/que-es-adblue-coches-diesel/

Statista. (Febrero de 2022). *Volumen de ventas anual de vehículos livianos y medianos en Chile de 2014 a 2021*. Obtenido de Statista: https://es.statista.com/estadisticas/1219121/volumen-ventas-anuales-automoviles-medianos-livianos-chile/

Taborelli, M. (18 de Junio de 2021). *La respuesta esperada: ¿Cuánto cuesta cargar un vehículo eléctrico en Chile?* Obtenido de Portal Movilidad: https://portalmovilidad.com/la-respuesta-esperada-cuanto-cuesta-cargar-un-vehiculo-electrico-en-chile/#:~:text=Es%20importante%20remarcar%20que%20al,por%20cada%20100%20kil%C3%B3metros%20recorridos.

Torres, D. (05 de Octubre de 2022). *La venta de vehículos eléctricos sigue creciendo en Colombia*. Obtenido de Motorysa: https://bydauto.com.co/blog/venta-vehiculos-electricos-sigue-creciendo-en-colombia/

Torroba, A. (2020). *Atlas de los biocombustibles*. Obtenido de Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA): https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/13974/BVE20128304e.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20cinco%20principales%20productores%20de,%2C%20Tailandia%2C%20India%20y%20Espa%C3%B1a.

UK Government. (2021). *Greenhouse gas reporting: conversion factors 2021*. Obtenido de UK Government: https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2021

United Nations. (2015). *El acuerdo de París*. Obtenido de United Nations Web site: https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris

Uriarte, M., & Díaz, M. (Abril de 2021). *IRVE 2050*. Obtenido de Departamento de Ingeniería eléctrica Usach: http://www.e2tech.cl/wp-content/uploads/2021/04/NP001___IRVE_2050___MU.pdf

Villarreal, D. (24 de Enero de 2022). *Tu próximo coche podría funcionar con hidrógeno verde*. Obtenido de Eléctricos: https://www.diariomotor.com/electricos/coche-hidrogeno-verde/

8. Anexos

Anexo 1: rendimientos 2021 y cálculo rendimientos 2050

Para los cálculos se utilizaron los rendimientos encontrados en la bibliografía. La Tabla 48 muestra los valores usados.

Tabla 48. Rendimientos utilizados 2021

Tipo de vehículo	Motor	Rendimiento	Unidades
VLM	Gasolina	15,28	km/l
VLM	Diésel	17,11	km/l
VLM	Eléctrico	6,25	km/kWh
Colectivos	Gasolina	15,28	km/l
Colectivos	Diésel	17,11	km/l
Colectivos	GLP	13,33	km/l
Motos	Gasolina	22,70	km/l
Buses	Diésel	2,85	km/l
Buses	Eléctrico	0,67	km/kWh
Camiones	Diésel	3,80	km/l
Camiones	Eléctrico	0,96	km/kWh

Fuente: elaboración propia

Cálculo rendimiento real vehículos livianos 2050

Debido a los rendimientos mínimos exigidos desde el año 2024 que irán aumentando hasta el 2030, es que se calcula el rendimiento real de los vehículos que se rigen bajo este estándar.

El cálculo es necesario para vehículos que usan combustibles líquidos diferentes a la bencina.

$$Rendimiento\ real = \frac{Rendimiento\ estándar\ \cdot\ \rho_{original} \cdot PC_{original}}{\rho_{gasolina} \cdot PC_{gasolina}} \quad (11)$$

Donde:

Rendimiento real: corresponde a los kilómetros recorridos con un litro de combustible usado;

Rendimiento estándar: rendimiento mínimo exigido correspondiente a kilómetros recorridos con un litro de gasolina equivalente. Desde el 2030 el valor es 28,9 [km/l_{ge}];

$\rho_{original}$: densidad del combustible utilizado en el vehículo en kilogramos por litro;

$PC_{original}$: poder calorífico en kilojoule por kilogramo de combustible usado;

$\rho_{gasolina}$: densidad de la gasolina kilogramos por litro;

$PC_{original}$: poder calorífico en kilojoule por kilogramo de gasolina.

Anexo 2: parque vehicular 2050

Para utilizar las tasas de crecimiento calculadas en el informe de INGEI (ver Tabla 16), es que se redistribuyeron los vehículos categorizados por el INE para poder agruparlos y asignarle una tasa. Para realizar esto, se hicieron supuestos como que "automóvil" considera todo vehículo particular y colectivo de menor tamaño. En la categoría a todo terreno se considera solamente las camionetas, ya que, aunque hay vehículos a todo terreno en la categoría anterior, no se sabe el porcentaje o cantidad que significan.

Para calcular la cantidad de vehículos que habría en el año 2050 se utilizó la Ecuación 12.

$$Vehículos_{2050} = Vehículos_{2021} \cdot \left(1 + \frac{tasa\%}{100}\right)^{29} \quad (12)$$

La Tabla 49 muestra las categorías, el número de vehículos que tiene cada grupo en el año 2021 y la cantidad de vehículos para el año 2050.

Tabla 49. Vehículos en 2021 y 2050

Tipo de vehículo	Cantidad 2021	Cantidad 2050
Automóvil	4.308.502	7.651.230
Todo terreno	1.062.379	4.372.896
Moto	234.020	52.873
Buses	134.637	239.094
Camión ligero	157.306	279.351
Camiones	76.411	180.068
Agrícola	7.438	4.140
Total	5.980.693	12.779.652

Fuente: elaboración propia

Anexo 3: densidades, poderes caloríficos y conversiones

Para los cálculos se requirieron transformar datos de consumo para poder utilizar los factores de emisión. Para ello se usaron densidades, poderes caloríficos y conversiones de unidades (ver tablas 50 y 51).

Tabla 50. Densidad y poder calorífico superior de combustibles

Densidades	**Unidades**	
Gasolina	0,73	ton/m^3
Diésel	0,84	ton/m^3
GLP	0,55	ton/m^3
PCS	**Unidades**	
Gasolina	46.860,8	kJ/kg
	11.200	kcal/kg
Diésel	45.605,6	kJ/kg
	10.900	kcal/kg
GLP	12.100	kcal/kg

Fuente: elaboración propia con información del Informe Balance Nacional de Energía 2019 (Ministerio de Energía , 2021)

Tabla 51. Conversiones usadas

Conversiones			
Valor	**Unidad**	**Valor**	**Unidad**
1	tcal	4,1868	terajoule
1	tcal	10^9	kcal
1	MWh	1000	kWh
1	kg	1000	g
1	ton	1000	kg
1	kton	1000	ton
1	m^3	1000	l

Fuente: elaboración propia

Anexo 4: consumos y emisiones de CO_2, CH_4 y N_2O de 2021

La Tabla 52 muestra el consumo de combustible o electricidad que utiliza un vehículo de cada categoría durante un año. Los valores son aquellos utilizados para calcular las emisiones en el año 2021.

Tabla 52. Consumo eléctrico y combustible por vehículo 2021

Tipo de vehículo	Motor	Consumo	Unidades
VLM	Gasolina	1.308,90	l/año
VLM	Diésel	1.168,91	l/año
VLM	Eléctrico	3.200,00	kWh/año
VLM	Híbrido	1.200,00	kWh/año
VLM	Híbrido	818,06	l/año
Colectivo	Gasolina	3.141,36	l/año
Colectivo	Diésel	2.805,38	l/año
Colectivo	Gas	3.600,00	l/año
Motos	Gasolina	770,93	l/año
Buses colectivos	Diésel	18.917,89	l/año
Bus eléctrico	Eléctrico	80.334,84	kWh/año
Camiones	Diésel	6.460,00	l/año
Camión eléctrico	Eléctrico	25.529,92	kWh/año

Fuente: elaboración propia

Los consumos de la Tabla 52 son transformados a unidades energéticas (TJ/año) para utilizar los factores de emisión. Los resultados se encuentran en la Tabla 53.

Tabla 53. Consumo energético por vehículo 2021

Tipo de vehículo	Combustible	Consumo (kg/año)	Consumo (Tcal/año)	Consumo (TJ/año)
VLM	Gasolina	955,50	0,01	0,04
VLM	Diésel	981,88	0,01	0,04
Colectivo	Gasolina	2293,19	0,02	0,10
Colectivo	Diésel	2356,52	0,02	0,10
Colectivo	Gas	1980,00	0,02	0,09
Motos	Gasolina	562,78	0,01	0,03
Buses colectivos	Diésel	15891,03	0,16	0,69
Camiones	Diésel	5426,40	0,06	0,24
Híbrido	Gasolina	597,19	0,01	0,03

Fuente: elaboración propia

Una vez que se tienen los valores de consumo, se utilizan los factores de emisión para obtener la masa de contaminante emitido por año. La Tabla 54 muestra las emisiones de dióxido de carbono, las cuales significan el 97,7% de las emisiones del parque vehicular del 2021.

Tabla 54. Emisiones de CO_2 2021

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones (kt CO_2/año)
VLM	Gasolina	11.440,07
VLM	Diésel	4.469,27
VLM	Híbrido	7,47
Colectivo	Gasolina	488,25
Colectivo	Diésel	190,74
Colectivo	Gas	32,51
Motos	Gasolina	406,58
Buses colectivos	Diésel	5.346,04
Camiones	Diésel	4.203,51
Emisiones totales		26.584,44

Fuente: elaboración propia

Las tablas 55 y 56 resumen las emisiones de metano y óxido nitroso del 2021.

Tabla 55. Emisiones de CH_4 2021

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones (kt CH_4/año)
VLM	Gasolina	4,13
VLM	Diésel	0,24
VLM	Híbrido	0,00
Colectivo	Gasolina	0,18
Colectivo	Diésel	0,01
Colectivo	Gas	0,03
Motos	Gasolina	0,02
Buses colectivos	Diésel	0,28
Camiones	Diésel	0,22
Emisiones totales		5,11

Fuente: elaboración propia

Tabla 56. Emisiones de N_2O 2021

Tipo de vehículo	Combustible	Emisiones (kt N_2O/año)
VLM	Gasolina	1,32
VLM	Diésel	0,24
VLM	Híbrido	0,00
Colectivo	Gasolina	0,06
Colectivo	Diésel	0,01
Colectivo	Gas	0,00
Motos	Gasolina	0,03
Buses colectivos	Diésel	0,28
Camiones	Diésel	0,22
Emisiones totales		2,16

Fuente: elaboración propia

Anexo 5: resultados 2050

El consumo de energía consumido por cada tipo de vehículo en el 2050 se encuentra en la Tabla 57.

Tabla 57. Consumo energético por vehículo a combustible 2050

Tipo de vehículo	Combustible	Consumo kg/año	Consumo tcal/año	Consumo TJ/año
VLM	Gasolina	505,19	0,01	0,02
VLM	Diésel	519,09	0,01	0,02
Colectivo	Gasolina	1.212,46	0,01	0,05
Colectivo	Diésel	1.245,83	0,01	0,05
Colectivos	GLP	1.122,27	0,01	0,05
Motos	Gasolina	562,78	0,01	0,03
Buses	Diésel	15.891,03	0,16	0,69
Camiones	Diésel	5.426,40	0,06	0,24

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.1: resultados Escenario 1

La Tabla 58 muestra el consumo eléctrico del Escenario 1.

Tabla 58. Consumo eléctrico (Escenario 1)

Tipo de vehículo	Consumo total eléctrico (MWh/año)
VLM	20.559.676,80
Colectivos	1.603.092,48
Motos	114.179,45
Buses	16.999.560,75
Camiones	9.150.778,42
Consumo total	48.427.287,90

Fuente: elaboración propia

A continuación, la Tabla 59 muestra el consumo energético de los vehículos que funcionan con combustibles.

Tabla 59. Consumo energético (Escenario 1)

Tipo de vehículo	Motor	Consumo energético total (TJ/año)
VLM	Gasolina	77.230,41
VLM	Diésel	27.404,33
Motos gasolina	Gasolina	5.146,71
Camiones	Diésel	34.364,17
Consumo total		144.145,63

Fuente: elaboración propia

La Tabla 60 muestra los efectos de variar el factor de emisión de la matriz eléctrica en un escenario con vehículos a batería.

Tabla 60. Variación matriz eléctrica Escenario 1.

Variación	Factor de emisión (tCO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos ($ktCO_2$/año)	Emisiones totales ($ktCO_2$/año)
+100%	0,81	39.284,22	49.895,00
+90%	0,77	37.320,01	47.930,79
+80%	0,73	35.355,79	45.966,58
+70%	0,69	33.391,58	44.002,37
+60%	0,65	31.427,37	42.038,16
+50%	0,61	29.463,16	40.073,95
+40%	0,57	27.498,95	38.109,74
+30%	0,53	25.534,74	36.145,53
+20%	0,49	23.570,53	34.181,31
+10%	0,45	21.606,32	32.217,10
0	0,41	19.642,11	30.252,89
-10%	0,37	17.677,90	28.288,68
-20%	0,32	15.713,69	26.324,47
-30%	0,28	13.749,48	24.360,26
-40%	0,24	11.785,26	22.396,05
-50%	0,20	9.821,05	20.431,84
-60%	0,16	7.856,84	18.467,63
-70%	0,12	5.892,63	16.503,42
-80%	0,08	3.928,42	14.539,21
-90%	0,04	1.964,21	12.575,00
-100%	0	0,00	10.610,78

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.1.1.: Escenario 1.1

La Tabla 61 muestra el total eléctrico consumido por todos los vehículos eléctricos del Escenario 1.1.

Tabla 61. Consumo eléctrico (Escenario 1.1)

Tipo de vehículo	Consumo total eléctrico (MWh/año)
VLM	12.335.804,80
VLM híbrido	3.083.952,00
Colectivos	1.603.092,48
Motos	114.179,45
Buses	16.999.560,75
Camiones	9.150.778,42
Consumo total	43.287.367,90

Fuente: elaboración propia

Los resultados del consumo de los vehículos con combustibles se muestran en la Tabla 62.

Tabla 62. Consumo energético (Escenario 1.1)

Tipo de vehículo	Motor	Consumo energético total (TJ/año)
VLM	Gasolina	77.230,41
VLM	Diésel	27.404,33
VLM	Híbrido	36.141,17
Motos gasolina	Gasolina	5.146,71
Camiones	Diésel	34.364,17
Consumo total		180.286,80

Fuente: elaboración propia

Al variar el factor de emisión de la matriz eléctrica con la composición vehicular del Escenario 1 se obtienen los valores de la Tabla 63.

Tabla 63. Variación matriz eléctrica (Escenario 1.1)

Variación	Factor de emisión (ton CO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos (kt CO_2/año)	Emisiones totales (kt CO_2/año)
+100%	0,81	35.114,71	48.338,83
+90%	0,77	33.358,98	46.583,09
+80%	0,73	31.603,24	44.827,36
+70%	0,69	29.847,51	43.071,62
+60%	0,65	28.091,77	41.315,89
+50%	0,61	26.336,03	39.560,15
+40%	0,57	24.580,30	37.804,42
+30%	0,53	22.824,56	36.048,68
+20%	0,49	21.068,83	34.292,94
+10%	0,45	19.313,09	32.537,21
0	0,41	17.557,36	30.781,47
-10%	0,37	15.801,62	29.025,74
-20%	0,32	14.045,89	27.270,00
-30%	0,28	12.290,15	25.514,27
-40%	0,24	10.534,41	23.758,53
-50%	0,20	8.778,68	22.002,80
-60%	0,16	7.022,94	20.247,06
-70%	0,12	5.267,21	18.491,32
-80%	0,08	3.511,47	16.735,59
-90%	0,04	1.755,74	14.979,85
-100%	0	0,00	13.224,12

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.1.2.: variación híbridos en Escenario 1

La Tabla 64 muestra las emisiones causadas por tener vehículos eléctricos, puros o una mezcla de estos en el Escenario 1.

Tabla 64. Variación de vehículos eléctricos e híbridos en Escenario 1.

Porcentajes		Emisiones (kt CO_2 / año)			
Vehículos eléctricos puros	**Vehículos híbridos**	**FE matriz actual**	**80% FE matriz 2021**	**20% FE matriz 2021**	**Matriz cero emisiones**
100%	**0%**	56.392,99	47.236,55	19.767,23	10.610,78
90%	**10%**	56.529,69	47.481,08	20.335,26	11.286,65
80%	**20%**	56.666,39	47.725,62	20.903,28	11.962,51
70%	**30%**	56.780,31	47.929,39	21.376,64	12.525,73
60%	**40%**	56.917,01	48.173,93	21.944,67	13.201,59
50%	**50%**	57.053,71	48.418,46	22.512,70	13.877,45
40%	**60%**	57.190,42	48.663,00	23.080,73	14.553,31
30%	**70%**	57.327,12	48.907,53	23.648,76	15.229,17
20%	**80%**	57.441,04	49.111,31	24.122,12	15.792,39
10%	**90%**	57.577,74	49.355,84	24.690,15	16.468,25
0%	**100%**	57.714,44	49.600,38	25.258,18	17.144,11

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.1.3.: camiones a hidrógeno

En el caso que el 71% de los camiones funcionen con hidrógeno las emisiones del escenario aumentarían. La Tabla 65 muestra las emisiones según diferentes matrices eléctricas.

Tabla 65. Escenario 1 con camiones a hidrógeno

Variación	Factor de emisión (tCO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos ($ktCO_2$/año)	Emisiones totales ($ktCO_2$/año)
+100%	0,81	0,81	76.399,77
+90%	0,77	0,77	72.579,78
+80%	0,73	0,73	68.759,80
+70%	0,69	0,69	64.939,81
+60%	0,65	0,65	61.119,82
+50%	0,61	0,61	57.299,83
+40%	0,57	0,57	53.479,84
+30%	0,53	0,53	49.659,85
+20%	0,49	0,49	45.839,86
+10%	0,45	0,45	42.019,88
0	0,41	0,41	38.199,89
-10%	0,37	0,37	34.379,90
-20%	0,32	0,32	30.559,91
-30%	0,28	0,28	26.739,92
-40%	0,24	0,24	22.919,93
-50%	0,20	0,20	19.099,94
-60%	0,16	0,16	15.279,95
-70%	0,12	0,12	11.459,97
-80%	0,08	0,08	7.639,98
-90%	0,04	0,04	3.819,99
-100%	0,00	0,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

Anexo 5.2: resultados Escenario 2

Para analizar el efecto los híbridos en el Escenario 2, se calcula nuevamente los consumos eléctricos suponiendo que todos los vehículos eléctricos son eléctricos puros (ver Tabla 66).

Tabla 66. Consumo eléctrico (Escenario 2)

Tipo de vehículo	Consumo total eléctrico (MWh/año)
VLM	14.179.088,00
Colectivos	1.603.092,48
Motos	78.744,37
Buses	16.999.560,75
Camiones	9.150.778,42
Consumo total	42.011.264,02

Fuente: elaboración propia

Los consumos de combustible también se ven afectados por la falta del combustible usado por híbridos (ver Tabla 67).

Tabla 67. Consumo energético (Escenario 2)

Tipo de vehículo	Motor	Consumo energético total (TJ/año)
VLM	Gasolina	109.617,34
VLM	Diésel	39.860,86
Motos gasolina	Gasolina	7.352,45
Camiones	Diésel	34.364,17
Consumo total		191.194,82

Fuente: elaboración propia

Finalmente, las emisiones del Escenario 2 sin híbridos según diferentes factores de emisión de la matriz eléctrica, se resumen en la Tabla 68.

Tabla 68. Variación matriz eléctrica (Escenario 2)

Variación	Factor de emisión (t CO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos (kt CO_2/año)	Emisiones totales (kt CO_2/año)
+100%	0,81	34.079,54	48.131,62
+90%	0,77	32.375,56	46.427,64
+80%	0,73	30.671,58	44.723,66
+70%	0,69	28.967,61	43.019,69
+60%	0,65	27.263,63	41.315,71
+50%	0,61	25.559,65	39.611,73
+40%	0,57	23.855,68	37.907,76
+30%	0,53	22.151,70	36.203,78
+20%	0,49	20.447,72	34.499,80
+10%	0,45	18.743,75	32.795,83
0	0,41	17.039,77	31.091,85
-10%	0,37	15.335,79	29.387,87
-20%	0,32	13.631,81	27.683,90
-30%	0,28	11.927,84	25.979,92
-40%	0,24	10.223,86	24.275,94
-50%	0,20	8.519,88	22.571,97
-60%	0,16	6.815,91	20.867,99
-70%	0,12	5.111,93	19.164,01
-80%	0,08	3.407,95	17.460,03
-90%	0,04	1.703,98	15.756,06
-100%	0,00	0,00	14.052,08

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.2.1.: Escenario 2.1

La Tabla 69 muestra el consumo eléctrico de los vehículos que funcionan con esa tecnología en el Escenario 2.1.

Tabla 69. Consumo eléctrico (Escenario 2.1)

Tipo de vehículo	Consumo total eléctrico (MWh/año)
VLM	8.507.452,80
VLM híbridos	2.126.863,20
Colectivos	1.603.092,48
Motos	78.744,37
Buses	16.999.560,75
Camiones	9.150.778,42
Consumo total	38.466.492,02

Fuente: elaboración propia

En el caso de los vehículos que funcionan a combustible, el consumo energético por categoría se encuentra en la Tabla 70.

Tabla 70. Consumo energético (Escenario 2.1)

Tipo de vehículo	Motor	Consumo energético total (TJ/año)
VLM	Gasolina	109.617,34
VLM	Diésel	39.860,86
VLM	Híbrido	24.924,94
Motos gasolina	Gasolina	7.352,45
Camiones	Diésel	34.364,17
Consumo total		216.119,77

Fuente: elaboración propia

Al variar el factor de emisión de la matriz eléctrica, se obtienen las emisiones del parque vehicular presentadas en la Tabla 71.

Tabla 71. Variación de matriz eléctrica (Escenario 2.1)

Variación	Factor de emisión (tCO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos ($ktCO_2$/año)	Emisiones totales ($ktCO_2$/año)
+100%	0,81	31.204,02	47.058,17
+90%	0,77	29.643,82	45.497,97
+80%	0,73	28.083,62	43.937,77
+70%	0,69	26.523,42	42.377,57
+60%	0,65	24.963,21	40.817,37
+50%	0,61	23.403,01	39.257,17
+40%	0,57	21.842,81	37.696,97
+30%	0,53	20.282,61	36.136,77
+20%	0,49	18.722,41	34.576,56
+10%	0,45	17.162,21	33.016,36
0	0,41	15.602,01	31.456,16
-10%	0,37	14.041,81	29.895,96
-20%	0,32	12.481,61	28.335,76
-30%	0,28	10.921,41	26.775,56
-40%	0,24	9.361,21	25.215,36
-50%	0,20	7.801,00	23.655,16
-60%	0,16	6.240,80	22.094,96
-70%	0,12	4.680,60	20.534,76
-80%	0,08	3.120,40	18.974,56
-90%	0,04	1.560,20	17.414,35
-100%	0	0,00	15.854,15

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.3: resultados Escenario 3

La distribución del Escenario 3 genera los consumos energéticos mostrados en la Tabla 72 para los vehículos con combustibles convencionales y en la Tabla 73 para los vehículos eléctricos.

Tabla 72. Consumo energético (Escenario 3)

Tipo de vehículo	Motor	Consumo combustible (TJ/año)
VLM	Gasolina	144.150,51
VLM	Diésel	52.662,45
Colectivo	Gasolina	6.552,08
Colectivo	Diésel	2.393,67
Colectivo	Híbrido	679,52
Motocicleta	Gasolina	9.680,72
Buses	Diésel	98.769,92
Camiones	Diésel	106.647,47
Consumo total		420.811,80

Fuente: elaboración propia

Tabla 73. Consumo eléctrico (Escenario 3)

Tipo de vehículo	Consumo total eléctrico (MWh/año)
VLM	7.444.022,40
Colectivos	336.652,80
Motos	41.340,73
Buses	5.949.861,67
Camiones	1.288.846,71
Consumo total	15.060.724,31

Fuente: elaboración propia

Variar el factor de emisión de la matriz eléctrica causa las emisiones de la Tabla 74 en el Escenario 3.

Tabla 74. Variación matriz eléctrica (Escenario 3)

Variación	Factor de emisión (tCO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos ($ktCO_2$/año)	Emisiones totales ($ktCO_2$/año)
+100%	0,81	12.217,26	43.428,56
+90%	0,77	11.606,40	42.817,70
+80%	0,73	10.995,53	42.206,84
+70%	0,69	10.384,67	41.595,97
+60%	0,65	9.773,81	40.985,11
+50%	0,61	9.162,94	40.374,25
+40%	0,57	8.552,08	39.763,39
+30%	0,53	7.941,22	39.152,52
+20%	0,49	7.330,36	38.541,66
+10%	0,45	6.719,49	37.930,80
0	0,41	6.108,63	37.319,93
-10%	0,37	5.497,77	36.709,07
-20%	0,32	4.886,90	36.098,21
-30%	0,28	4.276,04	35.487,35
-40%	0,24	3.665,18	34.876,48
-50%	0,20	3.054,31	34.265,62
-60%	0,16	2.443,45	33.654,76
-70%	0,12	1.832,59	33.043,89
-80%	0,08	1.221,73	32.433,03
-90%	0,04	610,86	31.822,17
-100%	0,00	0,00	31.211,30

Fuente: elaboración propia

Anexo 5.4: resultados Escenario 4

Para el Escenario 4 los consumos energéticos de los vehículos a combustible se muestran en la Tabla 75.

Tabla 75. Consumo energético (Escenario 4)

Tipo de vehículo	Motor	Consumo combustible (TJ/año)
VLM	Gasolina	182.300,92
VLM	Diésel	66.599,93
VLM	Híbrido	106,36
Colectivo	Gasolina	7.780,46
Colectivo	Diésel	2.842,42
Colectivo	GLP	609,94
Motocicleta	Gasolina	12.254,07
Buses	Diésel	150.689,19
Camiones	Diésel	118.484,55
Consumo total		541.667,84

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 76 se muestra el consumo total eléctrico del Escenario 4.

Tabla 76. Consumo eléctrico (Escenario 4)

Tipo de vehículo	Consumo total eléctrico (MWh/año)
VLM	5.552,00
VLM híbrido	10.162,80
Buses	141.490,99
Camiones	1.380,83
Consumo total	158.586,61

Fuente: elaboración propia

La Tabla 77 muestra los efectos de los cambios en la matriz eléctrica para el Escenario 4.

Tabla 77. Variación matriz eléctrica (Escenario 4)

Variación	Factor de emisión (tCO_2 eq/MWh)	Emisiones vehículos eléctricos ($ktCO_2$/año)	Emisiones totales ($ktCO_2$/año)
+100%	0,81	128,65	40.135,04
+90%	0,77	122,21	40.128,61
+80%	0,73	115,78	40.122,18
+70%	0,69	109,35	40.115,74
+60%	0,65	102,92	40.109,31
+50%	0,61	96,48	40.102,88
+40%	0,57	90,05	40.096,45
+30%	0,53	83,62	40.090,02
+20%	0,49	77,19	40.083,58
+10%	0,45	70,76	40.077,15
0	0,41	64,32	40.070,72
-10%	0,37	57,89	40.064,29
-20%	0,32	51,46	40.057,85
-30%	0,28	45,03	40.051,42
-40%	0,24	38,59	40.044,99
-50%	0,20	32,16	40.038,56
-60%	0,16	25,73	40.032,13
-70%	0,12	19,30	40.025,69
-80%	0,08	12,86	40.019,26
-90%	0,04	6,43	40.012,83
-100%	0,00	0,00	40.006,40

Fuente: elaboración propia

Anexo 6: variación entre volumen de gasolina vendida y calculada

La diferencia porcentual de volumen de gasolina vendida en Chile y volumen de gasolina calculado según rendimientos y recorridos anuales es de 11,7% y se obtiene mediante la Ecuación 13.

$$\frac{Volumen_{vendido} - Volumen_{calculado}}{Volumen_{vendido}} \cdot 100\% = Diferencia\ \% \quad (13)$$

Siendo el volumen vendido igual a 4.899.921 m^3 y el volumen calculado igual a 5.476.696,84 m^3.

Luego, se calcula las emisiones correspondientes al uso de la gasolina vendida siguiendo el procedimiento que se utilizó originalmente. La Tabla 78 sintetiza los resultados obtenidos

Tabla 78. Cálculo de emisiones de gasolina utilizada en el año 2021.

	Masa (kg/año)	**Energía (tcal/año)**	**Energía (TJ/año)**	**Emisiones (kg CO_2/año)**	**Emisiones (kt CO_2/año)**
2021 valor ventas	3.576.942.330	38.058,67	159.344,02	11.042.540.894,15	11.042,54
2021 valor obtenido	3.997.988.695	42.538,60	178.100,61	12.342.372.222,28	12.342,37

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se reemplaza las emisiones generadas por el volumen de gasolina vendida dentro de los cálculos del escenario original. Cabe destacar que esto se realiza solo para las emisiones de CO_2, ya que las emisiones de óxido nitroso y metano dependen del tipo de vehículo. Utilizando la Ecuación 14 se calcula las diferencias entre cada escenario, obteniéndose un 4,98% de disminución respecto al escenario original.

$$\frac{Emisiones_{original} - Emisiones_{nuevo}}{Emisiones_{original}} \cdot 100\% = Diferencia\ \% \quad (14)$$

Siendo, las emisiones originales 27.387,57 kt CO_2 equivalente, mientras que el valor nuevo es 26087,74 kt CO_2 equivalente.

Cabe destacar, que esto permite conocer la incertidumbre causada principalmente por el uso de rendimientos y recorridos promedio que causa un desajuste con la realidad. Sin embargo, esto no se puede corroborar para otros combustibles ya que el diésel y el GLP vendidos en Chile no solo se utilizan para transporte, sino que tienen usos en procesos y usos domésticos, como calefacción y generación de energía.

Anexo 7: eficiencia vehículos

La eficiencia de los vehículos es el porcentaje de energía que realmente es usada para el movimiento del vehículo.

En la Figura 7 se observa las pérdidas de energías que sufren tres tipos de vehículos: eléctricos a batería, con celdas de hidrógeno y convencionales con *e-fuels*. Se observa que los vehículos a eco-combustible son los con menor eficiencia energética, seguidos por los vehículos a hidrógenos, siendo, por lo tanto, los eléctricos los más eficientes. La eficiencia general incluye la eficiencia de producción de la energía junto con la eficiencia del vehículo en sí.

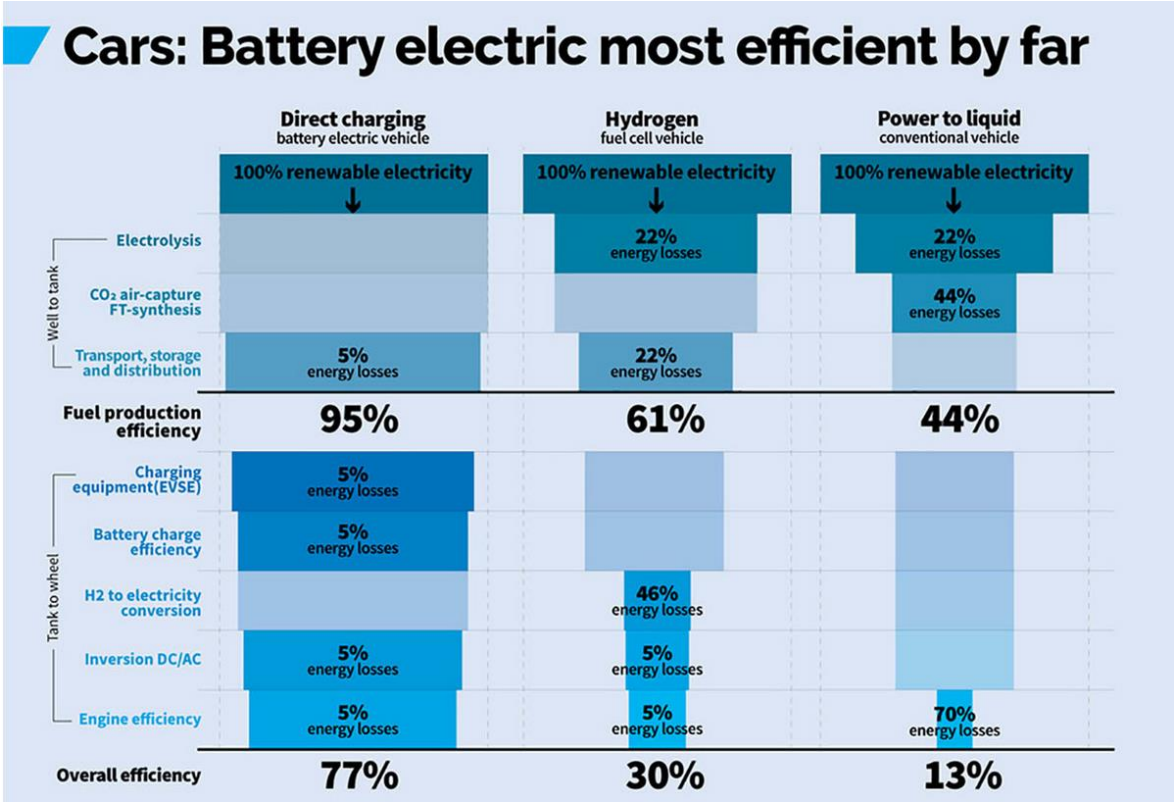

Figura 7. Eficiencia de autos eléctricos a batería, celda de hidrógeno y convencional con *e-fuels*.

Fuente: Motor pasión (Murias, 2020)

En el lado izquierdo de la Figura 7 se muestra que las pérdidas relacionadas a eléctricos puros provienen de: transporte, almacenamiento y distribución de la energía en lo que respecta la carga del vehículo; y durante su uso, provienen de las cargas del equipo, eficiencia del motor y batería, junto con la inversión de corriente. La eficiencia general alcanza un 77%. A su vez, el gráfico central muestra las pérdidas de vehículos a hidrógeno, se observa que antes de llegar al vehículo ya hay pérdidas de un 39% relacionadas a la electrólisis y al transporte, almacenamiento y distribución del hidrógeno. Las pérdidas de esta última categoría alcanzan un 22%, mientras que en autos eléctricos son un 5%. Luego, para el movimiento del vehículo se observa una pérdida significativa en la conversión de hidrógeno a electricidad y otras más pequeñas en lo que respecta a la eficiencia del motor y la inversión de corriente, resultando una eficiencia general de un 30%. Por último, a la derecha se observa el caso de un combustible líquido (*e-fuel*) en un vehículo convencional donde el motor tiene solamente un 30% de eficiencia, lo que junto a las pérdidas producto de la electrolisis y la captura de dióxido de carbono, hace que todo el ciclo sea el menos eficiente con solo un 13%.

Anexo 8: venta de autos nuevos y autos usados

La Figura 8 muestra la cantidad de vehículos nuevos y usados vendidos desde el 2017 hasta el 2022 (proyectando los meses faltantes del año) en los cinco más grandes mercados de Europa: Alemania, Francia, Italia, España y Reino Unido. La curva superior muestra las transacciones de vehículos usados, mientras que la de abajo la de vehículos nuevos. Se ve que desde el inicio de la pandemia se percibió una baja en las compras de ambas categorías, siendo mayor en la de vehículos nuevos. Los vehículos usados tuvieron una leve recuperación en el 2021, para descender nuevamente en el 2022.

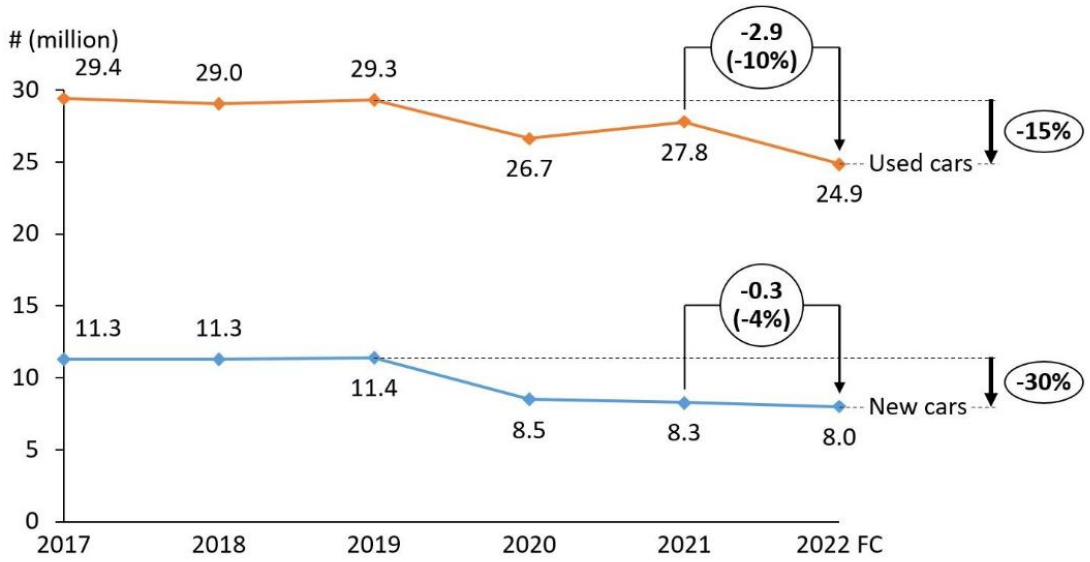

Figura 8. Vehículos usados y vehículos nuevos en Europa

Fuente: Autovista (Autovista, 2022)

Anexo 9: variación precio vehículos eléctricos

Una de las principales desventajas que presentaron los vehículos eléctricos al introducirse al mercado es su alto precio provocado principalmente por lo caro de las baterías, por lo que se esperaba que con una disminución del precio de éstas los vehículos también bajarían su valor. Sin embargo, los precios se han elevado por factores como la inflación, la disminución de producción durante la pandemia y el hecho que creadores de autos eléctricos han desarrollado vehículos de lujo vez de modelos más asequibles (Rivero, 2022).

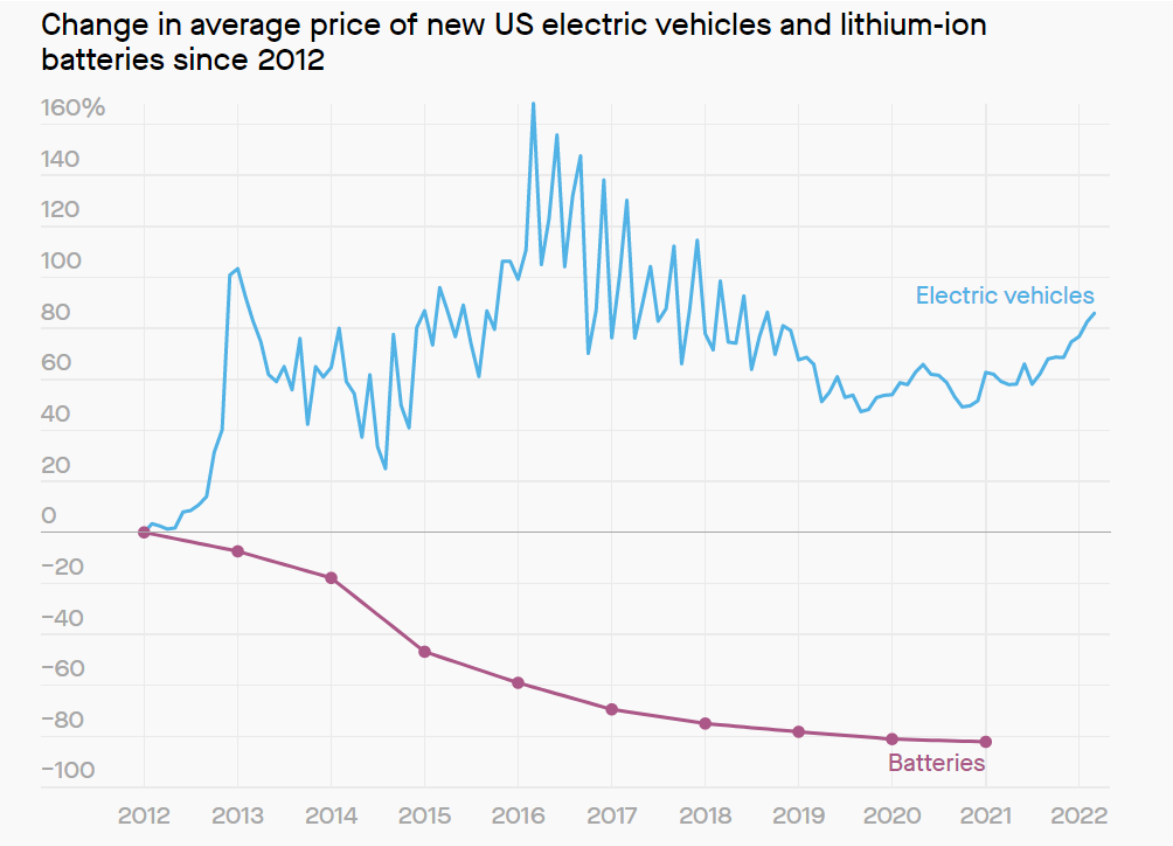

Figura 9. Variación de precio promedio de vehículos nuevos en Estados Unidos y de baterías de litio desde 2012.

Fuente: Quartz (Rivero, 2022)

La Figura 9 muestra como desde el año 2012 las baterías han disminuido en un 80% su precio, mientras que el valor de los vehículos eléctricos en Estados Unidos ha aumentado más de un 80% desde ese mismo año.

Anexo 10: Promedio ventas anuales VLM en Chile

Se estima los vehículos nuevos que se integran al parque automotor a lo largo de 15 años, para estudiar el efecto de la venta de únicamente vehículos cero emisiones desde 2035 a 2049.

La Tabla 79 muestra las ventas de vehículos livianos y medianos de los últimos ocho años. A partir de esto se obtiene que el promedio de ventas es de 343.825 vehículos al año.

Tabla 79. Volumen de venta de VLM de 2014 a 2021

Año	Número de vehículos
2014	337.594
2015	282.232
2016	305.540
2017	360.900
2018	417.038
2019	372.882
2020	258.835
2021	415.581
Promedio	343.825

Fuente: elaboración propia con información de Statista (2022).

Suponiendo un comportamiento similar para los próximos años, se puede calcular usando el valor promedio que en 15 años se venderían 5.157.375 vehículos.