



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA TRANSICIÓN HACIA TECNOLOGÍAS  
CERO EMISIONES EN FLOTAS DE VEHÍCULOS: CAMIONES CAEX, BUSES  
URBANOS E INTERURBANOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

IGNACIO ALEX LEPE GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:  
VICENTE SEPÚLVEDA FIGUEROA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MÓNICA ZAMORA ZAPATA  
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

SANTIAGO DE CHILE

2024

## MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA TRANSICIÓN HACIA TECNOLOGÍAS CERO EMISIONES EN FLOTAS DE VEHÍCULOS: CAMIONES CAEX, BUSES URBANOS E INTERURBANOS

Chile, comprometido con la carbono neutralidad para el año 2050, se encuentra en un proceso de transición energética. Es decir, busca reemplazar el consumo de combustibles fósiles por energías bajas o nulas en emisiones, en sectores clave como transporte y minería. El país se ha comprometido mediante las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), a cumplir con metas como 100 % de buses eléctricos a nivel nacional para 2040 y el 85 % de transporte de carga a hidrógeno para 2050. Esto implica la necesidad de tomar decisiones a corto y mediano plazo sobre el momento adecuado para renovar la flota vehicular, considerando factores como costos de tecnologías de cero emisiones, infraestructura de carga, demanda, características del recorrido, entre otros aspectos técnicos y económicos.

Este estudio se centra en proponer un modelo de optimización para determinar la tecnología más adecuada en el recambio de flotas por tecnologías cero emisiones, considerando proyecciones de costos de combustibles, inversión, estaciones de carga, consumo de combustible y emisiones de  $CO_2$  equivalente. Se evalúan tres casos: camión CAEX en mina a cielo abierto, bus interurbano entre Santiago - Valparaíso y bus urbano en la región de Valparaíso. Se realiza una revisión del estado del arte, se elabora una base de datos y se implementa un modelo de optimización en GAMS. Los resultados se evalúan en términos de costos, emisiones y consumo energético.

Los resultados indican que para el año 2050 se prevé un ahorro de 43M USD en el costo operativo (OPEX) de los camiones CAEX, a pesar de un aumento de 21M USD en el costo de inversión (CAPEX), lo que resulta en un ahorro neto de 22M USD. Para los buses interurbanos, se estima un ahorro de 2.1M USD en OPEX, aunque el CAPEX aumenta en 1.47M USD, generando un ahorro neto de 0.63M USD. En cuanto a los minibuses urbanos, se prevé un ahorro de 100K USD en OPEX, pero un aumento de 940K USD en CAPEX, lo que resulta en un gasto total mayor de 840K USD por la renovación de la flota. Aunque el gasto es mayor en este último caso, se decide llevar a cabo la renovación debido a las restricciones de emisiones establecidas para dicho año. Además, tanto los camiones CAEX como los buses interurbanos logran reducir las emisiones a cero antes de lo proyectado en la mayoría de los escenarios considerados.

Se destaca la inclusión del hidrógeno verde como una alternativa competitiva debido a que proporciona energía limpia y genera ahorros en cuanto a costos operativos. Sin embargo, su viabilidad económica depende de las proyecciones de precio, los avances tecnológicos y la evolución del mercado.

*Tatakae.*

# Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia, especialmente a mi mamá y a mi papá que durante toda mi vida me han apoyado y respetado en las decisiones que he tomado hasta este momento. También por su paciencia en soportarme en los períodos de mayor estrés en la universidad. De verdad, muchas, muchas gracias. Agradecer también a un integrante que llegó durante la pandemia y siempre que llego me recibe de la forma más alegre que puede como si fuera primera vez que me ve, gracias Copito por alegrarme la vida en cualquier momento.

A Katalina quien ha sido parte fundamental desde hace ya 7 años que está a mi lado, apoyándome en todo momento, siendo felices, compartiendo *hobbys*, descubriendo maravillas como *Evangelion* y *Shingeki* y un sinfín de cosas más.

A Sebastián, Ariel, Bastián, Adolfo, Daniel, Benjamín, Martín y Boris quienes son literalmente el mejor asado que pude tener en la vida, gracias por sus risas, por sus memes, por sus noches jugando a los jueguitos, por sus asados, por pasarlo tan bien desde el colegio y durante la universidad y por ser ahora mis *gymbros*.

A la gente que conocí en Bachi y siguieron también en Beauchef. Nelson, Diego y Renato, gracias por los largos días de estudio y almuerzos en 851.

A Vicente, mi profesor guía que lo descubrí buscando tema para mi trabajo de título en una charla en eléctrica. Gracias por el apoyo e interés desde el primer momento. Gracias por la paciencia y el tiempo empleado en mis dudas durante el desarrollo del modelo, enseñándome a utilizar nuevas herramientas que desconocía.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.2.1. Objetivo general . . . . .	4
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.3. Alcances . . . . .	4
1.4. Estructura . . . . .	4
<b>2. Antecedentes</b>	<b>6</b>
2.1. Usos del hidrógeno en transporte . . . . .	6
2.2. Cadena de valor del hidrógeno . . . . .	8
2.2.1. Producción de hidrógeno . . . . .	8
2.2.2. Almacenamiento de hidrógeno . . . . .	10
2.2.2.1. Compresión . . . . .	10
2.2.2.2. Licuefacción . . . . .	10
2.2.2.3. Adsorbentes químicos . . . . .	11
2.2.3. Transporte de hidrógeno . . . . .	11
2.2.3.1. Camiones . . . . .	11
2.2.3.2. Gaseoductos . . . . .	11
2.2.4. Estaciones de carga de hidrógeno . . . . .	12
2.3. Transporte . . . . .	12
2.3.1. Vehículos a hidrógeno . . . . .	12
2.3.1.1. Celda de combustible de hidrógeno . . . . .	12
2.3.2. Vehículos eléctricos . . . . .	13
2.3.3. Vehículos Diésel . . . . .	14
2.4. Transporte pesado sostenible: Estado actual . . . . .	14
2.5. Normativa . . . . .	15
2.6. Modelos de optimización . . . . .	16
<b>3. Metodología</b>	<b>18</b>
3.1. Descripción general . . . . .	18
3.2. Datos de entrada - Recopilación de datos . . . . .	19
3.3. Cálculos necesarios previo al modelo . . . . .	21
3.3.1. Ciclos de conducción . . . . .	21
3.3.1.1. Camión CAEX . . . . .	21
3.3.1.2. Bus interurbano Santiago - Valparaíso . . . . .	27

3.3.1.3.	Bus urbano Línea 702 - Valparaíso . . . . .	30
3.3.2.	Requerimientos de energía del vehículo . . . . .	31
3.4.	Emissiones de $CO_2$ . . . . .	34
3.5.	Modelo de optimización . . . . .	34
3.5.1.	Conjuntos de datos . . . . .	35
3.5.2.	Parámetros . . . . .	35
3.5.3.	Variables de decisión . . . . .	36
3.5.4.	Variables . . . . .	36
3.5.5.	Función objetivo . . . . .	36
3.5.6.	Restricciones . . . . .	36
3.6.	Escenarios . . . . .	39
3.6.1.	Referencia . . . . .	39
3.6.2.	Reducción 0 % de emisiones . . . . .	39
3.6.3.	Reducción 50 % de emisiones . . . . .	39
3.6.4.	Reducción 100 % de emisiones . . . . .	40
<b>4.</b>	<b>Implementación</b>	<b>41</b>
4.1.	Casos de estudio . . . . .	41
4.2.	Parámetros de cada tecnología . . . . .	42
4.3.	Ciclos de conducción . . . . .	42
4.3.1.	Perfil de elevación . . . . .	43
<b>5.</b>	<b>Resultados y discusiones</b>	<b>46</b>
5.1.	Escenarios . . . . .	46
5.1.1.	Referencia . . . . .	46
5.1.2.	Reducción 0 % de emisiones . . . . .	49
5.1.3.	Reducción 50 % de emisiones . . . . .	52
5.1.4.	Reducción 100 % de emisiones . . . . .	55
5.2.	Emissiones de $CO_2$ . . . . .	58
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>
	<b>Anexos</b>	<b>68</b>
A.	Antecedentes . . . . .	68
A.1.	Almacenamiento de hidrógeno . . . . .	68
B.	Resultados . . . . .	69
B.1.	Cálculo de factor de emisiones . . . . .	69
B.2.	Propiedades energéticos . . . . .	70
B.3.	Ciclos de conducción . . . . .	70
B.4.	Límite de emisiones . . . . .	70
B.5.	Costos . . . . .	71

# Índice de Tablas

2.1.	Emisiones de $CO_2$ equivalente (112 millones de toneladas) durante 2018 en los sectores de mayor participación. . . . .	6
3.1.	Conversiones de datos iniciales de la pendiente del trayecto del camión minero . . . . .	24
4.1.	Resultados tiempo y distancia de ciclo para cada caso de estudio. . . . .	42
4.2.	Resultados ciclos de conducción para los tres casos de estudio. . . . .	43
B.1.	Factor de emisiones de $CO_2$ eq. . . . .	69
B.2.	Rendimiento de componentes principales en vehículos diésel, hidrógeno y eléctrico. . . . .	70
B.3.	Propiedades energéticos . . . . .	70
B.4.	Datos intrínsecos de cada vehículo . . . . .	70
B.5.	Distancia recorrida por tramo en cada caso. . . . .	70
B.6.	Velocidad promedio obtenida en cada caso. . . . .	71
B.7.	Pendientes utilizadas en cada tramo. . . . .	71
B.8.	Emisiones iniciales de $CO_2$ equivalente para cada demanda, según la cantidad inicial de cada flota. . . . .	71
B.9.	Costo de estación por tipo de energético [Elaboración propia] . . . . .	71
B.10.	Costo de inversión de cada vehículo por tipo de energético [Elaboración propia [43] [45] [46] [47] ] . . . . .	72
B.11.	Costo de combustible para cada energético al año [Elaboración propia a partir de [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54]]. . . . .	74

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Comparaciones entre fuentes de energía y tecnologías [4]. . . . .	2
1.2.	Tipos de hidrógeno según su método de producción [5]. . . . .	3
2.1.	Durabilidad de celdas de combustibles en buses de $H_2$ [3]. . . . .	7
2.2.	Parámetros relevantes de buses de $H_2$ [3]. . . . .	8
2.3.	Composición de electrólisis AEC, PEM y SOE [11]. . . . .	9
2.4.	Características principales de rendimiento para AEC, PEM y SOE [12]. . . . .	9
2.5.	Principio de funcionamiento de una celda de combustible [9]. . . . .	13
2.6.	Esquema de componentes principales en vehículos fuel cell . . . . .	13
2.7.	Buses piloto a hidrógeno en Chile . . . . .	15
3.1.	Estructura general del modelo de optimización creado (Elaboración propia). . . . .	19
3.2.	Fuerzas o resistencias que interactúan con un vehículo en movimiento. Obtenido de [29].	20
3.3.	Diagrama del proceso del modelamiento físico [Elaboración propia]. . . . .	20
3.4.	Esquema general típico de operación de camiones CAEX en mina. Obtenido de [34]. . .	22
3.5.	Esquema simplificado de tramos relevantes en pendiente. Obtenido de [34]. . . . .	23
3.6.	Ciclo de conducción estudiado para el camión minero [Elaboración propia]. . . . .	23
3.7.	Conversión de pendiente en porcentaje [%] a grados [°]. Obtenido de [35]. . . . .	23
3.8.	Curva Rimpull para pendiente en subida [36]. . . . .	25
3.9.	Curva Rimpull para pendiente en bajada [36]. . . . .	26
3.10.	Recorrido del bus interurbano Santiago - Valparaíso [37]. . . . .	28
3.11.	Ciclo del recorrido del bus interurbano Santiago - Valparaíso. . . . .	29
3.12.	Ciclo del recorrido línea 702. . . . .	31
3.13.	Diagrama de cuerpo libre de un vehículo pesado en pendiente. . . . .	32
4.1.	Vehículos de referencia para el estudio. . . . .	41
4.2.	Perfil de elevación del bus interurbano para el 1er tramo: Terminal de buses Pajaritos - Túnel Lo Prado. . . . .	43
4.3.	Perfil de elevación del bus interurbano para el 3er tramo: Túnel Lo Prado - Túnel Zapata.	44
4.4.	Perfil de elevación del bus interurbano para el 5to tramo: Túnel Zapata - Terminal Rodoviario Valparaíso. . . . .	44
4.5.	Perfil de elevación del minibus urbano correspondiente a la ruta L702 de ida: Garita Galvarino - Camino Las Torres. . . . .	45
4.6.	Perfil de elevación del minibus urbano correspondiente a la ruta L702 de vuelta: Camino Las Torres - Fin 702. . . . .	45
5.1.	Gráficos obtenidos en el escenario de referencia para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	47

5.2.	Gráficos obtenidos en el escenario de referencia para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	48
5.3.	Gráficos obtenidos en el escenario de referencia para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	49
5.4.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 0 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	50
5.5.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 0 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	51
5.6.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 0 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	52
5.7.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 50 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	53
5.8.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 50 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	54
5.9.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 50 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	55
5.10.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 100 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	56
5.11.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 100 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	57

5.12.	Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 100 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. <b>(a)</b> N° de camiones y estaciones de carga. <b>(b)</b> Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. <b>(c)</b> Consumo de combustible [GWh]. <b>(d)</b> Costo de operación [USD]. . . . .	58
5.13.	Emisiones de $CO_2$ equivalente para demanda de mina rajo en los 4 escenarios supuestos [Elaboración propia]. . . . .	59
5.14.	Emisiones de $CO_2$ equivalente para demanda de ruta Santiago - Valparaíso en los 4 escenarios supuestos [Elaboración propia]. . . . .	60
5.15.	Emisiones de $CO_2$ equivalente para demanda de L702 en los 4 escenarios supuestos [Elaboración propia]. . . . .	61
A.1.	Cuadro comparativo entre los distintos tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido [13]. . . . .	68
A.2.	Camión Tube Trailer [13]. . . . .	68
A.3.	Dispensador de hidrógeno gaseoso de NEL [3]. . . . .	69
B.1.	Costo de combustible diésel entre 2023-2050 [Elaboración propia a partir de [48], [49] [50]]. . . . .	72
B.2.	Costo de combustible hidrógeno entre 2023-2050 [Elaboración propia a partir de [51], [52]]. . . . .	73
B.3.	Costo de combustible electricidad entre 2023-2050 [Elaboración propia a partir de [53], [54]]. . . . .	73

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Para lograr la carbono neutralidad en Chile al año 2050, se han propuesto medidas de mitigación tales como el retiro de las centrales a carbón, la electrificación de usos motrices y térmicos, la electromovilidad e hidrógeno verde en transporte de carga, entre otros. Estas últimas medidas ligadas al transporte en sus distintos modos implican un recambio de flotas de vehículos importante, ya que por ejemplo, se tiene como meta llegar al 100 % de buses eléctricos al año 2040 a nivel nacional, 100 % de taxis eléctricos al año 2050 y un 85 % del transporte de carga sea a hidrógeno al año 2050, entre otras [1].

Lo anterior, implica que buses a gasolina o a diésel dejarían de operar en menos de 20 años, y camiones y taxis, en menos de 30 años. Los tres modos mencionados coinciden en que su operación tienen fines principalmente económicos y son intensivos en jornadas de trabajo. Por lo tanto, el recambio de estos modos de transporte debe ser acorde a las características operacionales, económicamente viables y cumplir con las exigencias de la meta de carbono neutralidad.

También está el desafío de incorporar al hidrógeno verde como vector energético en el sector transporte. Este elemento no existe libremente en la naturaleza, por ende, se trata de un vector energético que se debe “crear”. Los vectores energéticos son aquellas sustancias o dispositivos que almacenan energía, de tal modo que esta se pueda liberar luego de forma controlada. En donde, a diferencia de las fuentes primarias de energía, se tratan de productos manufacturados, en los que previamente se ha invertido cantidades de energía mayor para su elaboración [2].

Este elemento se considera como una alternativa limpia en diferentes ámbitos para su uso, debido a que no produce gases de efecto invernadero como el  $CO_2$  (solo si se obtiene utilizando energías renovables y agua) al ser usado para generar calor o electricidad, ya que el único producto de esta reacción es el vapor de agua [3], por ende, tiene un potencial significativo para la seguridad energética y la descarbonización.

El hidrógeno puede usarse como combustible, ya que tiene un alto poder calorífico de  $120[MJ/kg]$ , mientras que el diésel alcanza los  $43[MJ/kg]$  y las baterías de ion-litio llegan a los  $0,65[MJ/kg]$  tal como se aprecia en la Figura 1.1 (A). Sin embargo, el hidrógeno posee una baja densidad volumétrica

(energía por unidad de volumen) que en condiciones atmosféricas alcanza los  $0,0898[g/l]$ , mientras que el diésel por su parte tiene  $875[g/l]$  [3]. Sin embargo, al aumentar la presión del hidrógeno hasta los  $700[bar]$  este llega a un valor de aproximadamente  $5[MJ/l]$  aumentando su competitividad, pero aún lejos de los  $37[MJ/l]$  del diésel. En la Figura 1.1 (A) se observa de mejor forma la diferencia energética volumétrica y gravimétrica entre los distintos combustibles como el diésel, el hidrógeno y las baterías eléctricas de ion-litio.

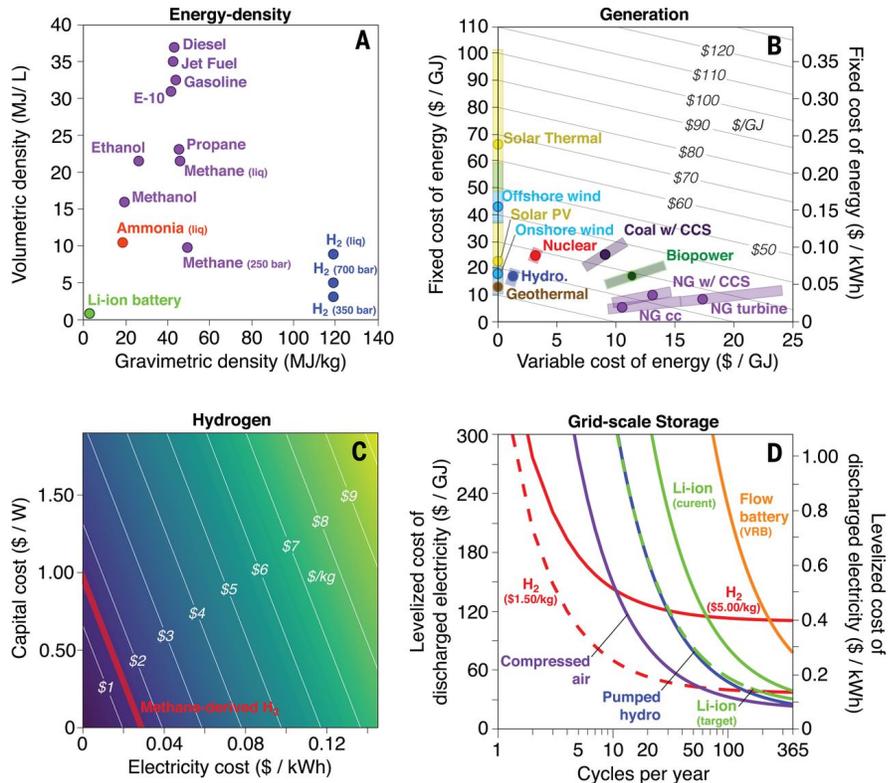


Figura 1.1: Comparaciones entre fuentes de energía y tecnologías [4].

Por otra parte como se aprecia de la Figura 1.1 (B) las energías renovables como la solar o eólica no presentan costos variables sino que solo costos fijos, lo cual motiva y sustenta el potencial solar que posee Chile, derivando en menores costos del hidrógeno como se aprecia en la Figura 1.1 (C).

Ahora bien, para que el uso del hidrógeno realmente ayude a la descarbonización se deben tener claro los diferentes tipos de hidrógeno que existen. Estos se distinguen debido a su método de producción, en la Figura 1.2 se observan las diferencias entre estos. Existen dos grandes grupos, a la izquierda los que utilizan combustibles fósiles para producirse como es el caso del carbón y gas natural, los cuales generan emisiones altas o muy altas en el proceso. Por otro lado, desde el hidrógeno rosa hacia la derecha ya no se emplean combustibles fósiles para generar dicho energético por lo que producen bajas o muy bajas emisiones durante el proceso.

# El pantone del hidrógeno

Tipos según la tecnología empleada en su producción

Autor: Álvaro Merino (2022)  
\*El hidrógeno amarillo también puede referirse a aquel que es generado con fuentes mixtas



Figura 1.2: Tipos de hidrógeno según su método de producción [5].

La introducción de nuevos combustibles y tecnologías de transporte plantea desafíos operacionales que deben ser considerados cuidadosamente. Por ejemplo, la inclinación o pendiente de un trayecto afecta de manera distinta a vehículos grandes como camiones CAEX en comparación con vehículos más pequeños. Además, el correcto funcionamiento del hidrógeno a grandes alturas sobre el nivel del mar y las diversas proyecciones de costos del combustible generan incertidumbre al planificar cambios tecnológicos en el transporte. Estas variables, entre otras, resaltan la importancia de desarrollar un modelo que optimice y abarque múltiples aspectos para facilitar la toma de decisiones en la transición hacia combustibles alternativos y tecnologías más sostenibles.

Por ello, en este trabajo se estudia la adopción del hidrógeno verde (o renovable) y almacenamiento en baterías eléctricas en flotas de vehículos de alto consumo energético, con el fin de aportar con la transición energética del sector transporte y minería, y el cumplimiento de los compromisos nacionales con la carbono neutralidad.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo consiste en proponer un modelo de optimización que determine la tecnología óptima para la renovación a flotas de vehículos cero emisiones, sujeto a restricciones de emisiones totales durante su operación y al cumplimiento de medidas de mitigación.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Revisar el estado del arte en cuanto al modelamiento de flotas de vehículos, estaciones de carga y distintos energéticos, entre ellos, hidrógeno verde y electricidad por baterías.
- Elaborar un modelo de optimización con una base de datos que considere distintos energéticos, escenarios y modos de transporte.
- Caracterizar y modelar los requerimientos operacionales y de recarga de vehículos.
- Caracterizar y modelar los requerimientos de estaciones de carga de hidrógeno y de electricidad.

## **1.3. Alcances**

El presente trabajo se enfocará en tres flotas de vehículos, camiones CAEX, buses interurbanos y buses urbanos, a modo de comparar las diferencias y características técnicas-operacionales que necesita cada una de ellas para realizar el cambio tecnológico a cero emisiones. Además, se simplificará el modelamiento de la estación de carga desde la generación eléctrica hasta la capacidad que posee dicha estación, tomando en cuenta finalmente solo al costo de inversión de esta.

El procesamiento, almacenamiento, distribución y venta del oxígeno que genera la producción de hidrógeno por medio de la electrólisis queda fuera de los alcances del presente trabajo.

## **1.4. Estructura**

En el capítulo 2, se revisa la información disponible en cuanto a los antecedentes requeridos, con el fin de comprender los usos del hidrógeno en el transporte, la cadena de valor de este, la diferencia entre los vehículos diésel, hidrógenos y eléctricos, las normativas requeridas al momento de querer realizar un recambio de flotas de vehículos o de tecnología y finalmente los modelos de optimización existentes. El tercer capítulo detalla la metodología empleada para desarrollar el modelo de optimización, partiendo por la definición de los casos de estudio, siguiendo con la recopilación de datos, luego cálculos previos para el modelo, como la obtención del tiempo y distancia de ciclo de los tres recorridos junto a los requerimientos de energía de los vehículos. Luego, una descripción de como funciona el modelo de optimización diseñado y finalmente la definición de los cuatro escenarios supuestos. El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos previos al modelo, como requisito de este. El quinto capítulo expone los resultados de las proyecciones obtenidas de los cuatro escenarios distintos para las tres tipos de flotas, mostrando la cantidad de vehículos y estaciones de carga a través del horizonte de evaluación, los costos de inversión y de estaciones de carga, el consumo de combustible energético, los costos

de operación y las emisiones de  $CO_2$  equivalente en cada caso. Por último, la conclusión resume los análisis del capítulo anterior destacando los puntos relevantes, el cumplimiento de los objetivos, las posibles mejoras y desarrollo futuro asociados al presente trabajo.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Usos del hidrógeno en transporte

El ministerio del medio ambiente de Chile el año 2021 estableció la meta de reducir en un 30 % las emisiones del país a 2030 y con respecto a la carbono neutralidad a 2050 [6] [7]. Además, el Ministerio de Energía señala que el impulso al desarrollo de la industria del hidrógeno verde podría equiparar al 2050 lo que es el cobre hoy en nuestro país [8].

Ahora bien, sumado a lo dicho en la introducción, es conveniente utilizar el hidrógeno renovable en medios de transporte como en buses, ya que además de la descarbonización, se espera que el "*break even*" (punto en donde una tecnología se vuelve económicamente competitiva por sobre otra) de los buses de hidrógeno con respecto a los buses de combustión interna (diésel) y a los buses de batería se espera que suceda en el año 2026 y 2027 respectivamente [9].

Por otro lado, se debe tener en cuenta que el sector que contribuye mayores emisiones de  $CO_2$  corresponde al transporte con 37 % de las emisiones. Particularmente en el caso de Chile, se observa en la Tabla 2.1 la importancia de estas en el sector transporte.

Tabla 2.1: Emisiones de  $CO_2$  equivalente (112 millones de toneladas) durante 2018 en los sectores de mayor participación.

Industria	% Emisiones
Producción Energía	30,39
Transporte	25,77
Manufacturera y Construcción	14,12
<b>Total</b>	<b>70,28</b>

Junto a lo anterior, En Chile, durante el 2022, se aprobó la nueva versión de la Estrategia Nacional de Electromovilidad, que establece que a partir del año 2035 el 100 % de las ventas de vehículos livianos, medianos y de transporte público (buses, taxis y colectivos), y que maquinaria de gran tamaño sean cero emisiones [3].

Por otra parte, para el desarrollo e implementación del hidrógeno en distintos medios de transporte como buses, camiones y vehículos pequeños, se han realizado proyectos piloto en distintos países como China, japon, Estados Unidos, Escocia, Dinamarca y Chile, entre otros países, siendo el Toyota Mirai

uno de los más conocidos en cuanto a vehículos livianos. También proyectos como “*The CHIC project (Clean Hydrogen in European Cities)*” recordado como uno de los primeros pasos de la aplicación de esta tecnología en buses, el cual desplegó 60 buses en 8 países de Europa durante 2010-2016. Por otra parte, con respecto a camiones, ESORO lanzó el primer camión FC (“*Fuel Cell*”) del mundo en la categoría de 34 toneladas en 2017 [9].

Ahora bien, para cada uno de estos casos ya sea bus, camión o vehículo liviano, se les denomina comúnmente vehículos “*fuel cell*” proveniente de “*fuel cell electric vehicle*”, la que utiliza hidrógeno para generar corriente eléctrica y así energizar el vehículo, en donde a su vez también pueden contar con baterías eléctricas de apoyo. En cambio, en los vehículos eléctricos a batería estos obtienen directamente la energía eléctrica a partir de un sistema de baterías instalados en el equipo [3].

A lo largo de los años, se han levantado insumos en base a los proyectos realizados, uno de estos aspectos es por ejemplo la durabilidad de los buses a hidrógeno. La Figura 2.1 muestra el estado de los buses a julio de 2020 en EEUU, en donde las celdas de los 4 primeros buses ya fueron retirados, los cuales todos superaron las 25.000 horas de operación (que era el rendimiento objetivo equivalente entre 4 a 6 años). Por otra parte, aún existen sistemas de hidrógeno en operación en los que la mayoría ya ha sobrepasado el objetivo propuesto por el Departamento de Energía de Estados Unidos [3].

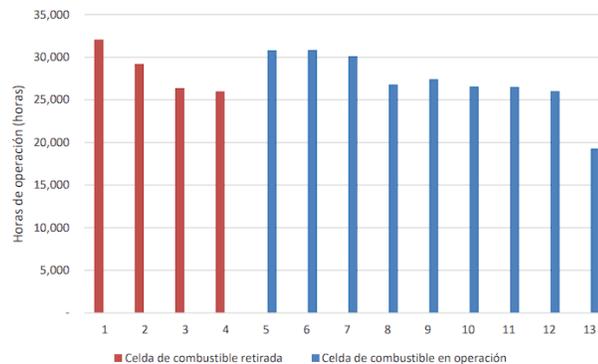


Figura 2.1: Durabilidad de celdas de combustibles en buses de  $H_2$  [3].

Otro variable relevante es la disponibilidad de los buses, siguiendo con el mismo caso de EEUU, se observa que la disponibilidad de operación de los buses de hidrógeno está por debajo del diésel debido a que se le realizaron mantenciones preventivas más recurrentes al bus de  $H_2$  y por fallas asociadas a otros componentes del vehículo como problemas en el sistema eléctrico o aire acondicionado. Sin embargo, si se analiza solo el sistema de hidrógeno (sin considerar fallas en la batería, chasis o aire acondicionado) la disponibilidad supera el 95 % muy similar a la de los buses diésel, como se muestra en la Figura 2.4 (a).

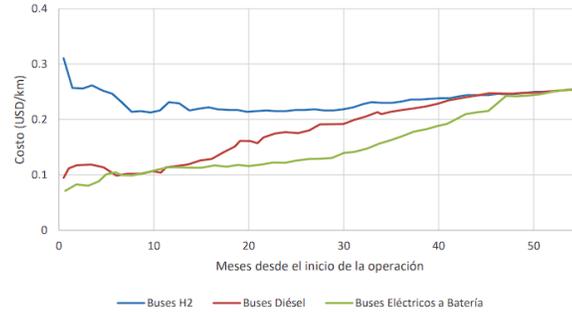
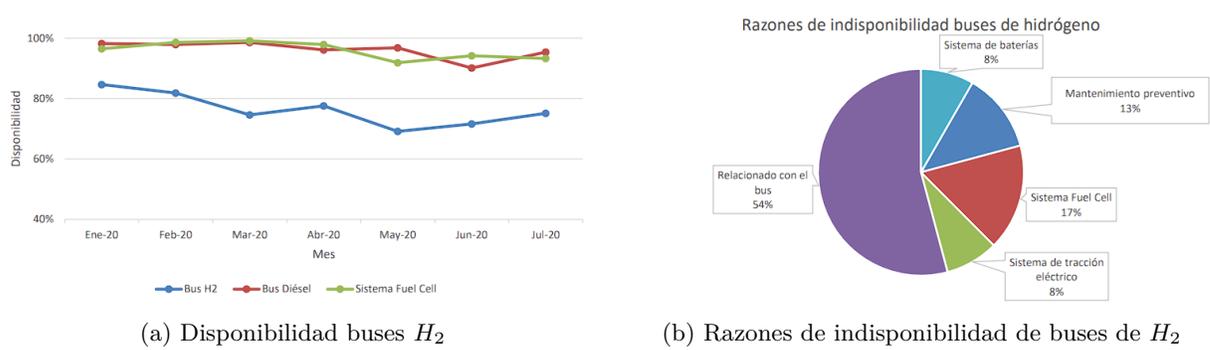


Figura 2.2: Parámetros relevantes de buses de  $H_2$  [3].

Al observar la Figura 2.4 (c) del estudio es posible deducir que al comparar en el tiempo los costos de mantenimiento de buses de hidrógeno, eléctricos a batería y diésel en los meses de operación del proyecto se ve como convergen las tres tecnologías. En un comienzo los buses de hidrógeno tienen mayor costo de mantenimiento porque se debe capacitar al personal que no conocen bien esta nueva tecnología. Pero luego, el costo en recursos humanos como en piezas necesarias para los buses de hidrógeno se mantiene más bien estable, a diferencia de los buses diésel y eléctricos a batería, en donde han observado que sus costos de mantenimiento aumentan en el tiempo [3].

## 2.2. Cadena de valor del hidrógeno

### 2.2.1. Producción de hidrógeno

Como se dijo anteriormente, el hidrógeno no se encuentra en su estado puro en la naturaleza, por ende, se trata de un vector energético el cual debe producirse necesariamente en una planta adecuada. En dichas plantas generalmente se separa el hidrógeno a partir de una molécula o compuesto dado por medio de alguno de los siguientes métodos [10]:

- Termoquímicos: se utiliza calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno a partir de combustibles convencionales o biomasa.
- Electrolíticos: el agua ( $H_2O$ ) se disocia en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) por medio de electricidad.
- Biológicos: microorganismos, como bacterias y algas pueden generar hidrógeno por medio de procesos biológicos propios de estas.

- Otros procesos: descomposición foto catalítica y biológica del agua

Focalizándose en el método electrolítico predominan 3 de ellos, electrólisis alcalina celular (AEC), electrólisis de membrana polimérica (PEM) y electrólisis de óxido sólido (SOEC).

Ahora bien, esta electrólisis se realiza dentro de un electrolizador, y estos se componen de un ánodo y cátodo que están separados por un electrolito. Los distintos electrolizadores funcionan de manera diferente, principalmente debido al distinto tipo de material electrolítico que interviene y a las especies iónicas que conduce [3]. De estos, el PEM es el tipo más comercializado en la actualidad, debido a su baja temperatura de operación (50-100°C), corto tiempo de arranque y facilidad de uso de su oxidante (aire atmosférico) [9]. En la Figura 2.3 se observan las diferencias entre ellas.

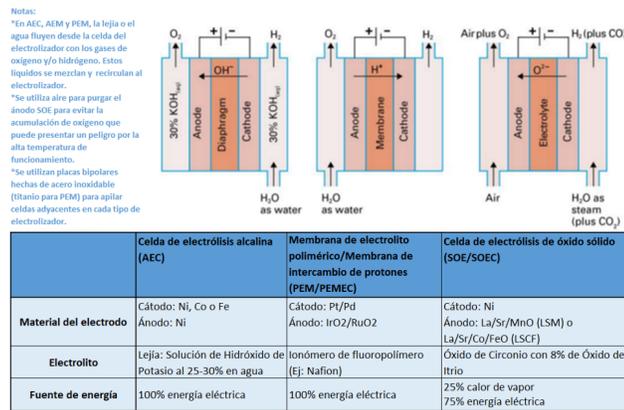


Figura 2.3: Composición de electrólisis AEC, PEM y SOE [11].

A continuación, en la Figura 2.4 se observa una tabla con los indicadores clave de rendimiento para las tres principales tecnologías de electrolizadores de agua y sus rendimientos futuros objetivo.

Parámetros	Alcalina		PEM		SOE	
	2020	Objetivo 2050	2020	Objetivo 2050	2020	Objetivo 2050
Temperatura de funcionamiento (°C)	70-90	>90	50-80	80	700-850	<600
Presión de funcionamiento (bar)	<30	>70	<30	>70	1	>20
Densidad de corriente (A/cm <sup>2</sup> )	0.2-0.8	>2	1-2	4-6	0.3-1	>2
Rango de voltaje (V)	1,4-3	<1,7	1,4-2,5	<1,7	1-1,5	<1,48
Eficiencia de voltaje (%)	50-68	>70	50-68	>80	75-85	>85
Eficiencia eléctrica (Pila) (kWh/kgH <sub>2</sub> )	47-66	<42	47-66	<42	35-50	<35
Eficiencia eléctrica (Sistema) (kWh/kgH <sub>2</sub> )	50-78	<45	50-83	<45	40-50	<40
Rango de carga (%)	15-100	5-300	5-120	5-300	30-125	0-200
Máx. área del electrodo (cm <sup>2</sup> )	10.000-30.000	30.000	1.500	>10.000	200	500
Tamaño de la unidad de la pila (MW)	1	10	1	10	0,005	0,2
Pureza de H <sub>2</sub> (%)	99,9%-99,9998%	>99,9999%	99,9%-99,9999%	99,9%-99,9999%	99,9%	>99,9999%
Arranque en frío (min)	<50	<30	<20	<5	>600	<300
Costo de capital de la pila (mín 1 MW) (USD/kW)	270	<100	400	<100	>2.000	<200
Costo de capital del sistema (mín 10 MW) (USD/kW)	500-1.000	<200	700-1.400	<200	Desconocido	<300
Vida útil (horas)	60.000	100.000	50.000-80.000	100.000-120.000	<20.000	80.000

Figura 2.4: Características principales de rendimiento para AEC, PEM y SOE [12].

## 2.2.2. Almacenamiento de hidrógeno

Existen diversas metodologías para almacenar el hidrógeno; entre las principales se encuentran las siguientes.

### 2.2.2.1. Compresión

Este primer método para almacenar el hidrógeno es el más utilizado, el cual consiste en comprimir este gas a altas presiones, de manera que disminuya su volumen y por consecuencia aumentar la densidad energética volumétrica. Por ejemplo, a 200 [bar] se tienen 14,7 [kg/m<sup>3</sup>], pero al aumentar la presión a 450 [bar] u 800 [bar] la densidad volumétrica aumenta a 28,8 [kg/m<sup>3</sup>] y 43,4 [kg/m<sup>3</sup>] respectivamente [13].

Para ello se requieren tanques de presión de hidrógeno adecuados estructuralmente y seguros que no generen “*Blistering*” (generación de burbujas de gas) o “*Embrittlement*” (fenómeno que causa la pérdida de ductilidad y por ende hace que el material se vuelva frágil). Existen 5 tipos de tanques de hidrógeno comprimido que cumplen de acuerdo a las distintas aplicaciones, materiales de fabricación y presiones admisibles máximas, estos pueden verse con detalle en la Figura A.1 del Anexo.

Por ende, dado lo visto anteriormente, el hidrógeno producido mediante electrólisis tiene una presión de salida aproximadamente de 30 [bar], pero por ejemplo los buses la almacenan a 350 [bar] con el fin de reducir el volumen del gas. Para llevar a cabo esto, se debe elevar la presión aún más que lo requerido, debido a que se utiliza comúnmente el método de cascada (la fuente de origen tiene una presión mayor que la presión existente en la fuente de destino). Usualmente se comprime el gas hasta los 350 [bar] o 700 [bar] dependiendo de la tasa de compresión que se requiera [3].

Por ende, de acuerdo a la Figura A.1 existen en el mercado tanques de almacenamiento presión máxima de operación desde los 200 [bar] hasta los 1000 [bar] [3], en donde Los tanques de almacenamiento estacionarios son tanque tipo I, los de tipo II para hidrogeneras y los de tipo III y IV para aplicaciones móviles con celdas de combustible.

### 2.2.2.2. Licuefacción

Este segundo método consiste en llevar el hidrógeno a estado líquido, también se le conoce por el nombre de hidrógeno criogénico. Esto se logra a unos -252.87 [°C]. Debido al cambio de estado aumenta la densidad energética manteniendo la presión de 1 [atm]. Cabe notar que en este estado líquido el hidrógeno es 850 veces más denso que en su fase gaseosa y es por ello que es utilizado en electromovilidad y también para la exportación a largas distancias [13].

También se debe considerar que para disminuir la temperatura de 1 [kg] de hidrógeno es necesario utilizar 13.2 [kWh] de energía eléctrica y además unos 3.3 [kWh] para mantenerlo en este estado gaseoso y a estas bajas temperaturas [13].

Por otra parte, los tanques de almacenamiento que se utilizan deben reducir y minimizar la transferencia de calor entre la pared interior del tanque con el exterior para evitar el cambio de estado, es decir, reducir la evaporación del hidrógeno (“*Boil-off*”). Para ello, los tanques consisten en dos cilindros concéntricos que entre medio tienen una capa de vacío y varias capas de aislante. También

poseen sistemas de liberación de presión por si es necesario [13].

### 2.2.2.3. Adsorbentes químicos

En este método el hidrógeno se incorpora a la estructura sólida química de diferentes materiales. El caso más representativo es el caso del amoníaco, ya que los tanques y por ende el transporte de este gas incoloro tienen menos restricciones que los tanques vistos anteriormente (hidrógeno líquido o comprimido) ya que se requiere de menores presiones al momento de su operación y de temperaturas cercanas a los  $-10$  °C. Luego, la molécula de  $NH_3$  se puede descomponer para utilizar el hidrógeno nuevamente donde sea requerido [13].

Por otro lado, existen otros compuestos como el Hidruro de Magnesio ( $MgH_2$ ) o Borohidruro de Litio ( $LiBH_4$ ) que actualmente no tienen aplicaciones comerciales disponibles y siguen en proceso de investigación. Sin embargo, se ha considerado utilizar portadores de hidrógeno orgánico líquido ( $LOHC$ ) debido a que es sencillo de usar en condiciones ambientales normales, lo cual su uso puede estar enfocado en el transporte a largas distancias [13].

## 2.2.3. Transporte de hidrógeno

### 2.2.3.1. Camiones

Para el caso del transporte de hidrógeno gaseoso comprimido si se trata de volúmenes pequeños a medianos se usan camiones especiales, pero para volúmenes grandes se utilizan los llamados “*Tube Trailers*”, los cuales consisten en “*racks*” de cilindros de gas presurizados que están agrupados en un marco protector de acero, estos se pueden apreciar en la Figura A.2 [14].

Cabe notar que una unidad “*Tube Trailer*” puede transportar aproximadamente 500 [kg], esto dependerá de la presión del contenedor y del material del mismo. Por ejemplo, un “*Tube Trailer*” con capacidad de 350 [kg –  $H_2$ ] tiene una presión de 180 [bar]. Y actualmente, el estanque más grande para transportar hidrógeno gaseoso es de 26 [ $m^3$ ], con 500 [bar] de presión puede cargar unos 1.100 [kg] de hidrógeno por viaje [14].

Ahora bien, el costo fijo de este tipo de camiones ronda entre los 100 a 120 USD por día, y a su vez el costo variable asociado a la distancia de transporte de hidrógeno es de 3 USD por kilómetros recorrido. Junto a esto, cabe notar que los costos de transporte son elevados, por ende, para proyectos de recambio de flotas se debiese preferir la producción local [3].

Por otro lado, para el caso del transporte de hidrógeno líquido ( $LH_2$ ) debido a su mayor densidad comparado con el hidrógeno gaseoso comprimido, los estanques pueden almacenar mayores cantidades en su interior. Pero, comparándolo con otros combustibles líquidos como el diésel (850 [kg/ $m^3$ ]), el  $LH_2$  es menor [14].

### 2.2.3.2. Gaseoductos

Esta segunda forma consiste en transportar el hidrógeno en estado gaseoso por medio de tuberías en grandes volúmenes es la opción más rentable. Esto conlleva a requerir una alta inversión inicial que se compensaría con las altas cantidades de hidrógeno a transportar [14].

## 2.2.4. Estaciones de carga de hidrógeno

En esta última etapa se encuentra el sistema de dispensado de hidrógeno. Como se vio anteriormente existen dos presiones para dispensar el combustible, a 350 [bar] y 700 [bar], pero cabe notar que la presión de 350 [bar] es la que se utiliza para equipos pesados como buses y camiones, mientras que la presión de dispensado de 700 [bar] se utiliza en vehículos pequeños como automóviles y camionetas. Por ejemplo, existe un dispensador de hidrógeno que ofrece la empresa Nel (Figura A.3, el cual tiene la capacidad de recargar vehículos cuyos tanques tengan una capacidad entre 10 a 50 [kg] a una presión de 350 [bar]. Además, estos operan a temperaturas de entre -20 °C y 40 °C al igual que los tanques de almacenamiento [3].

## 2.3. Transporte

### 2.3.1. Vehículos a hidrógeno

Ahora bien, todos los vehículos *fuel cell* poseen tanques de almacenamiento de hidrógeno, una celda de combustible, una batería y un motor eléctrico, junto a los sistemas de control para cada componente, tal como se aprecia en la Figura 2.6 que corresponden a los casos de estudio de este trabajo. Entonces como se pudo apreciar el elemento distintivo es la celda de combustible la cual se explica a continuación.

#### 2.3.1.1. Celda de combustible de hidrógeno

Es un reactor electroquímico el cual tiene como objetivo convertir la energía química entre un combustible y un oxidante en electricidad. Comúnmente se usa este término “*fuel cell*” para describir un reactor de este tipo que usa el hidrógeno como fuente principal de energía.

La reacción que se produce en esta celda, entre el hidrógeno y el oxígeno es:  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ . Por otra parte, el hidrógeno y el oxígeno se introducen en la celda por diferentes lugares. Como se observa en la Figura 2.5 el hidrógeno se suministra al electrodo superior (ánodo) mientras que el oxígeno al electrodo inferior (cátodo). Ambos electrodos los separa un electrolito que funciona como un filtro para evitar que los reactivos de la celda se mezclen entre sí y también para controlar como los iones creados durante la reacción parcial del hidrógeno con el ánodo se permite llegar hasta el cátodo [9].

Entonces, la reacción ocurre de la siguiente manera: el hidrógeno entra al ánodo, estas moléculas reaccionan con el recubrimiento del ánodo liberando electrones y formando iones de hidrógeno positivos. Dichos iones atraviesan el electrolito y llegan al cátodo. Por otro lado, los electrones se dirigen por un circuito eléctrico generando la energía que se requiere utilizar. Volviendo al cátodo, el catalizador permite que los iones de hidrógeno y los electrones se unan con el oxígeno suministrado, lo cual genera como único subproducto vapor de agua [9].

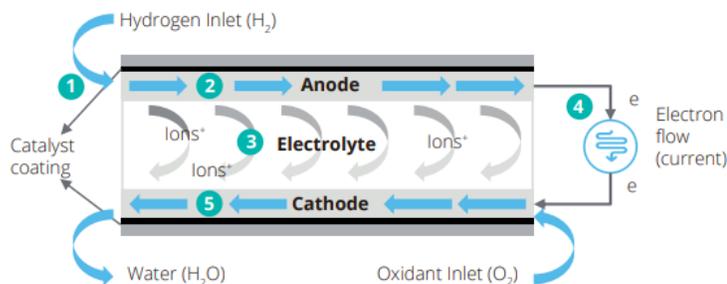
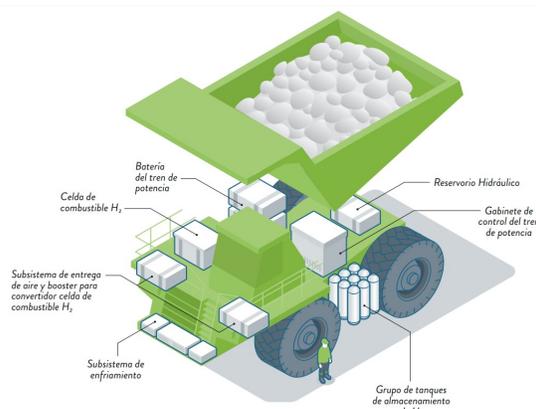


Figura 2.5: Principio de funcionamiento de una celda de combustible [9].



(a) Esquema estructura CAEX a hidrógeno [15]



(b) Esquema estructura bus interurbano a hidrógeno [16]

Figura 2.6: Esquema de componentes principales en vehículos fuel cell

### 2.3.2. Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos se pueden clasificar en tres tipos de tecnologías: eléctricos a batería (BEV, “*Battery Electric Vehicle*”), eléctricos híbridos enchufables (PHEV, “*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*”) que poseen motor de combustión y motor eléctrico y además entran en esta categoría los vehículos eléctricos con celdas de combustible de hidrógeno (FCEV, “*Fuel cell electric vehicle*”).

Por otro lado, este tipo de vehículos poseen menor cantidad de piezas mecánicas en su tren de tracción a diferencia de un vehículo típico diésel. En este caso el mecanismo de tracción consiste básicamente de 3 componentes, un motor eléctrico, un banco de baterías y un sistema de freno regenerativo.

En primer lugar, el motor eléctrico se encarga de entregar la energía necesaria para el movimiento del vehículo. Hay tres tipos principales, de inducción, síncronos y reluctancia conmutada. Este componente se regula por medio de un Sistema de Control de Potencia y además es conectado a las baterías para que sea alimentado energéticamente. Además, las principales características destacables son que estos motores poseen una alta densidad de potencia, altas eficiencias por sobre el 94 %, alto torque de arranque, operación constante a velocidades altas y menores requerimientos de mantenimiento.

En segundo lugar, los tres tipos de tecnologías (BEV, PHEV y FCEV) utilizan baterías que varían su capacidad dependiendo del vehículo y los requerimientos que posea. Y dentro de las baterías existen

dos tecnologías que son las más comunes, se trata de las baterías electrostáticas y electroquímicas, pero la más comúnmente utilizada dentro de este último grupo es la batería de Ion-Litio. Cabe notar que las baterías también poseen un sistema de control, en este caso se controlan los flujos de energía de entrada y salida por medio de un Sistema de Gestión de Batería (BMS o “*Battery Management System*”).

Finalmente, el último gran componente es el Sistema de Freno Regenerativo el cual consiste en transformar la energía cinética que posea el vehículo al momento en que este frene en energía eléctrica que almacena en las baterías de este. A diferencia de un vehículo de combustión interna, la energía al frenar se disipa en forma de calor y se pierde. Pero en este caso cuando se suelta el pedal del acelerador o se utiliza el pedal del freno, el motor eléctrico comienza a funcionar como generador al aprovechar la energía cinética y el movimiento de las ruedas [17].

### 2.3.3. Vehículos Diésel

Estos vehículos poseen un motor diésel, este es un motor de combustión interna, es decir, transforma la energía química que proviene del combustible (diésel), en energía mecánica. Últimamente este tipo de tecnología es de las más utilizadas debido a su relación costo/beneficio que poseen, ya que el diésel, al ser más denso energéticamente, permite obtener mayores cantidades de energía en comparación con los motores a gasolina [18].

Ahora bien, su principal característica es que su combustible se auto inflame debido a las altas temperaturas que se generan dentro proveniente de la alta relación de compresión del motor. Esto quiere decir que la compresión aumenta la temperatura de la cámara de combustión: cuando el combustible (el gasoil, gasóleo o diésel) es inyectado y se mezcla con el aire caliente, se produce su autoinflamación. Esto quiere decir que no se necesita de una chispa inicial, a diferencia de como ocurre en los motores de gasolina. Por lo tanto la combustión, a su vez, causa la expansión del gas de la cámara de combustión y mueve el pistón hacia fuera generando el movimiento que transmite hacia las ruedas [19].

Sin embargo, el gran inconveniente de este combustible al igual que otros combustibles fósiles es la gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que generan en su funcionamiento, incluso genera más que la gasolina. Junto a esto se suma a que estos motores no solo son más pesados sino también mucho más ruidosos que los de gasolina [19].

## 2.4. Transporte pesado sostenible: Estado actual

En cuanto al transporte, para el caso de los camiones mineros CAEX actualmente la mayor parte corresponden a vehículos diésel. Sin embargo, existen camiones híbridos diésel-eléctricos, pero recientemente hasta la fecha de este trabajo General Motors ha establecido una colaboración con Komatsu en Japón para crear un módulo de energía basado en pila de combustible de hidrógeno destinado al camión minero Komatsu 930E [20].

Por otra parte, los buses interurbanos y minibuses urbanos eléctricos están más desarrollados comparado con los camiones CAEX. Un claro ejemplo es la actual la flota de buses RED en la región Metropolitana. Pero también existen buses a la venta por Reborn Electric motors, quien dispone de

buses urbanos Queltehue para 24 pasajeros, autonomía de 200 km y 45 minutos para completar la carga de su batería, y a su vez también ofrecen buses interurbanos Tricahue con capacidad para 44 pasajeros, 200 km de autonomía y 90 minutos para recargarse [21].

Ahora bien, en cuanto a buses que utilizan celdas de combustible de hidrógeno, en el país solo existe el bus interurbano adquirido como proyecto piloto de la marca Foton, el cual tiene capacidad para 47 pasajeros, está equipado con una pila de hidrógeno SinoHytec G120 de 120 kW, una batería de litio-ferrofosfato CATL de 149 kWh y 400 km de autonomía [22].

Por otro lado, en cuanto a minibuses urbanos se está desarrollando un proyecto innovador para la fabricación integral del primer bus a hidrógeno 100% diseñado en Chile que posee las siguientes características: capacidad para 24 pasajeros, velocidad máxima de 90 Km/h, autonomía estimada de 450 km, tanques de almacenamiento de combustible con una capacidad aproximada de 20 Kg [23].



(a) Piloto bus interurbano modelo Foton [22]



(b) Piloto minibus urbano 100% fabricado en Chile [23]

Figura 2.7: Buses piloto a hidrógeno en Chile

## 2.5. Normativa

Ahora bien, para poder realizar un recambio de flotas de vehículos y más aún si se trata de otra tecnología a la usada previamente es necesario cumplir con distintas normativas requeridas en el país, a continuación, se describen las más relevantes a tener en consideración.

- Norma SAE J2601/1-2, la cual define las velocidades de dispensado de hidrógeno y establece que se pueden realizar cargas de 30 g/s, 60 g/s, y la carga rápida de 120 g/s [3].
- Ley 21.305 de Eficiencia Energética. Define al Hidrógeno como un combustible. Esto permite que el Ministerio de Energía regule su uso. Beneficios tributarios para automóviles “cero emisiones”, entre los que se incluyen los automóviles de Hidrógeno [24].
- Decreto 122/1991 que fija requisitos dimensionales y funcionales a vehículos que presten servicios de locomoción colectiva (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones) [24].
- Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas (Decreto 43/2016 del Ministerio de Salud) [24].

- Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (Decreto 594/2000 del Ministerio de Salud) [24].
- Reglamento transporte de cargas peligrosas por calles y caminos (Decreto 298/1995 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones) [24].
- Reglamento de manipulación y almacenamiento de cargas peligrosas en recintos portuarios (Resolución 96/1996 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones) [24].
- Reglamento de seguridad minera (Decreto 132/2004 del Ministerio de Minería) [24].
- Reglamento de instalaciones interiores y medidores de gas (Decreto 66/2007) [24].

## 2.6. Modelos de optimización

Se investigaron distintos modelos de optimización posibles que fueran adecuados para utilizar en este trabajo. En primer lugar existen herramientas como el Modelo de planificación energética PMR. Este es un modelo matemático basado en un enfoque de optimización y simulación, el cual utiliza el lenguaje GAMS (*General Algebraic Modeling System*) para solucionar tanto problemas lineales como no lineales [10]. Este modelo permite evaluar el impacto combinado de distintas medidas de mitigación que contribuyan a cumplir la meta de carbono neutralidad de emisiones en Chile hacia el año 2050.

Para su funcionamiento considera distintos aspectos como la integración de oferta y demanda, es decir, se proyecta en forma integrada tanto la oferta (fuentes y tecnologías: centrales solares fotovoltaicas, CSP, eólica, geotermia, hidroeléctricas y de biomasa) como la demanda de energía (sectores: transporte, industria, minería, comercial, público y residencial).

Así también considera todos los energéticos primarios y secundarios (diésel, gasolina, kerosene, gas natural, gas licuado, carbón, electricidad, hidrógeno, etc.). Además, asimila los distintos costos como inversión, operación y mantenimiento para optimizar, y por último, realiza una proyección de GEI que se basa en metodologías del Inventario de Gases de Efecto Invernadero [10].

En resumen, el funcionamiento de este modelo viene dado inicialmente por un modelo de datos, que consiste en la base de datos con todos los valores necesarios según el caso, como aspectos técnicos, costos, demandas, flujos, procesos, etc. Luego, se elabora el modelo de optimización en GAMS en donde se definen distintos elementos como las restricciones, función objetivo y límites de producción. Finalmente, se obtienen los resultados o proyecciones de salida que entrega esta herramienta, como por ejemplo: emisiones, capacidad, energía, generación eléctrica, etc. [10].

Por otro lado, está el modelo LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*) en donde su principal objetivo consiste en brindar un soporte integrado y confiable, para el desarrollo de estudios de planeamiento energético integral y de mitigación de GEI (Gases de Efecto Invernadero) [25].

Por su parte, GREET (*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies*) es una herramienta que examina los impactos del ciclo de vida de las tecnologías, combustibles, productos y sistemas de energía de los vehículos [26].

Por otro lado, también existen desarrollos de modelos de optimización para el reemplazo solo de flotas de transporte urbano de pasajeros, como el desarrollado en la Universitat Politècnica de València el cual “con el acceso a los datos reales de las flotas, fue desarrollada e implementada la metodología combinada entre la herramienta gerencial Life Cycle Cost y el modelo matemático de Simulación Monte Carlo, mediante la realización de un análisis estocástico, considerando tanto la edad y el kilometraje promedio anual” [27].

Analizándolos, en primer lugar se descartó el modelo LEAP debido a que su acceso es restringido y además su alcance es más general que lo requerido para este trabajo. Por otra parte, se podría utilizar el modelo GREET para evaluar el rendimiento ambiental y energético de los vehículos de hidrógeno en comparación con los vehículos convencionales, pero de igual forma no cubriría con los resultados que se quieren obtener como la propuesta de flota para cada año, los costos unitarios, el modelamiento mecánico requerido y con ello las fuerzas que afectan al vehículo en cuestión en cada instante.

Por su parte, se decidió por no utilizar el modelo de planificación energética PMR directamente, debido a que en el presente trabajo se necesita la implementación de un modelamiento mecánico del transporte, lo cual el modelo PMR no lo considera. Si bien, el alcance de esta herramienta no es tanto más general que lo que se necesita para este trabajo, se decidió por elaborar un modelo propio teniendo como base fundamental en cuanto a la propuesta metodológica al modelo PMR.

Es decir, se utilizó GAMS como lenguaje de optimización, tomando una estructura similar al modelo PMR pero con modificaciones orientadas al modelamiento de rutas y consumos energéticos por tramos. Si bien existen varias opciones de resolución disponibles, GAMS/CPLEX calcula y optimiza problemas específicos como el presente [28].

Cabe destacar que se utilizó como base el informe técnico **Evaluación Técnico-Económica: Implementación Flota de Buses de Hidrógeno en el sistema de Transporte Metropolitano RED** [3] para el procedimiento del cálculo de los requerimientos de potencia y energía de un vehículo pesado con regeneración de energía.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Descripción general

La estructura del modelo de optimización creado se compone de 3 grandes partes. En primer lugar se tiene un modelo de datos, el cual posee la base de datos que utiliza el modelo, es decir, se ubican los datos de entrada donde se definen diferentes valores (“*inputs*”) como datos asociados para cada transporte (cantidad inicial, cantidad ciclos, tipo demanda, etc.), a las distintas tecnologías y energéticos (masa, densidad de combustible, PCI, densidad volumétrica y gravimétrica, etc.), costos de inversión y de operación, características técnicas (masa del vehículo cargado o vacío, área frontal del vehículo, coeficiente aerodinámico, gravedad, densidad del aire). Cabe notar que todos estos datos de entrada están en formato Excel.

Luego, el modelo de optimización se genera en el programa GAMS (*General Algebraic Modeling System*) el cual se ejecuta y encuentra solución según los elementos de optimización definidos como la función objetivo de minimización de costos, las diferentes restricciones que sustentan el modelo y hagan que tenga sentido en lo que calcula, ecuaciones de energía, emisiones, etc. Es decir, el objetivo de este es hallar un resultado óptimo en el cual decida la mejor combinación para invertir y realizar la transición energética en los casos de estudio, analizando las tecnologías, energéticos y otros aspectos para minimizar los costos de operación principalmente.

Por último, dentro de la generación del código de GAMS se pueden especificar diferentes elementos de salida, como la cantidad de vehículos a utilizar en cada año, la cantidad de ciclos, las energías utilizadas, el consumo de combustible y emisiones asociadas según energético, el costo de operación, el costo de inversión, etc. Todos estos resultados son entregados en formato CSV. Esta estructura se puede apreciar de forma clara en la Figura 3.1.

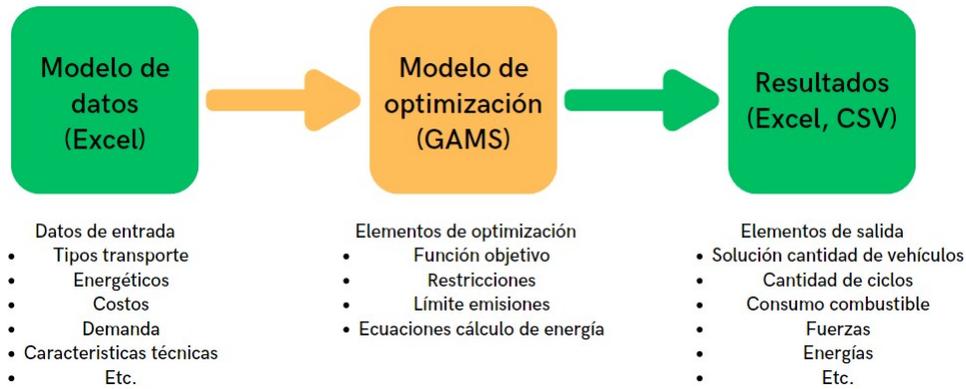


Figura 3.1: Estructura general del modelo de optimización creado (Elaboración propia).

### 3.2. Datos de entrada - Recopilación de datos

En primer lugar, resultó fundamental para los resultados que entregó el modelo tener una base de datos consistente lo más cercana posible a la realidad de los tres casos de estudio. Entonces fue necesario buscar las fichas técnicas de los nueve vehículos del estudio, con el objetivo de obtener características como el peso bruto vehicular y la carga máxima admitida para el caso del camión CAEX, las velocidades máximas permitidas, la potencia máxima, las medidas del largo, ancho y alto del vehículo, la capacidad de pasajeros, la autonomía, tiempos de recarga y capacidad del tanque de combustible.

Luego, se procedió a buscar los distintos coeficientes como el coeficiente de resistencia a la rodadura ( $f$ ) el cual depende del estado del camino, la densidad del aire ( $\rho$ ), el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) que depende del tipo de vehículo y su forma, el coeficiente inercial ( $\delta$ ) relacionado al movimiento del vehículo, los cuales fueron necesarios para el cálculo de energía de los vehículos (ver Anexo B.4). A continuación, se comenzó con la búsqueda de las eficiencias de los componentes más relevantes de un vehículo diésel, eléctrico y de celda de combustible de hidrógeno, las eficiencias buscadas en cada caso corresponden a la eficiencia de la transmisión entre las ruedas y el motor, la eficiencia del motor (diésel y eléctrico), la eficiencia de la batería eléctrica y la eficiencia de la celda de combustible de hidrógeno (ver Anexo B.2).

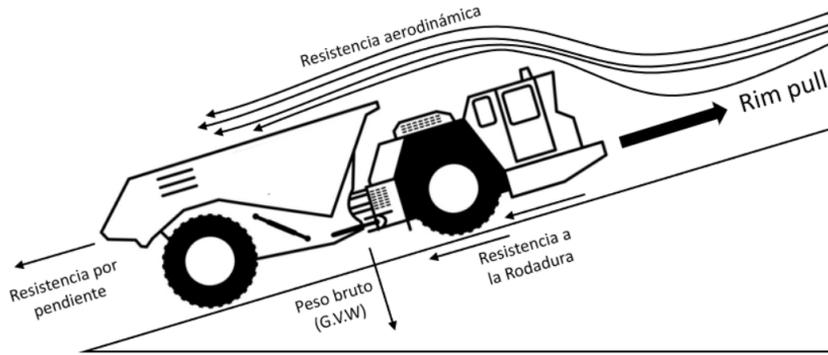


Figura 3.2: Fuerzas o resistencias que interactúan con un vehículo en movimiento. Obtenido de [29].

Se tuvo en consideración que los sistemas de transmisión en vehículos diésel suelen ser más complejos desde el punto de vista mecánico. Involucran una caja de cambios, embrague (en el caso de transmisiones manuales), y componentes adicionales que generan pérdidas mecánicas. Por ello se supone que los vehículos diésel tendrán una eficiencia entre 85 % y 90 %.

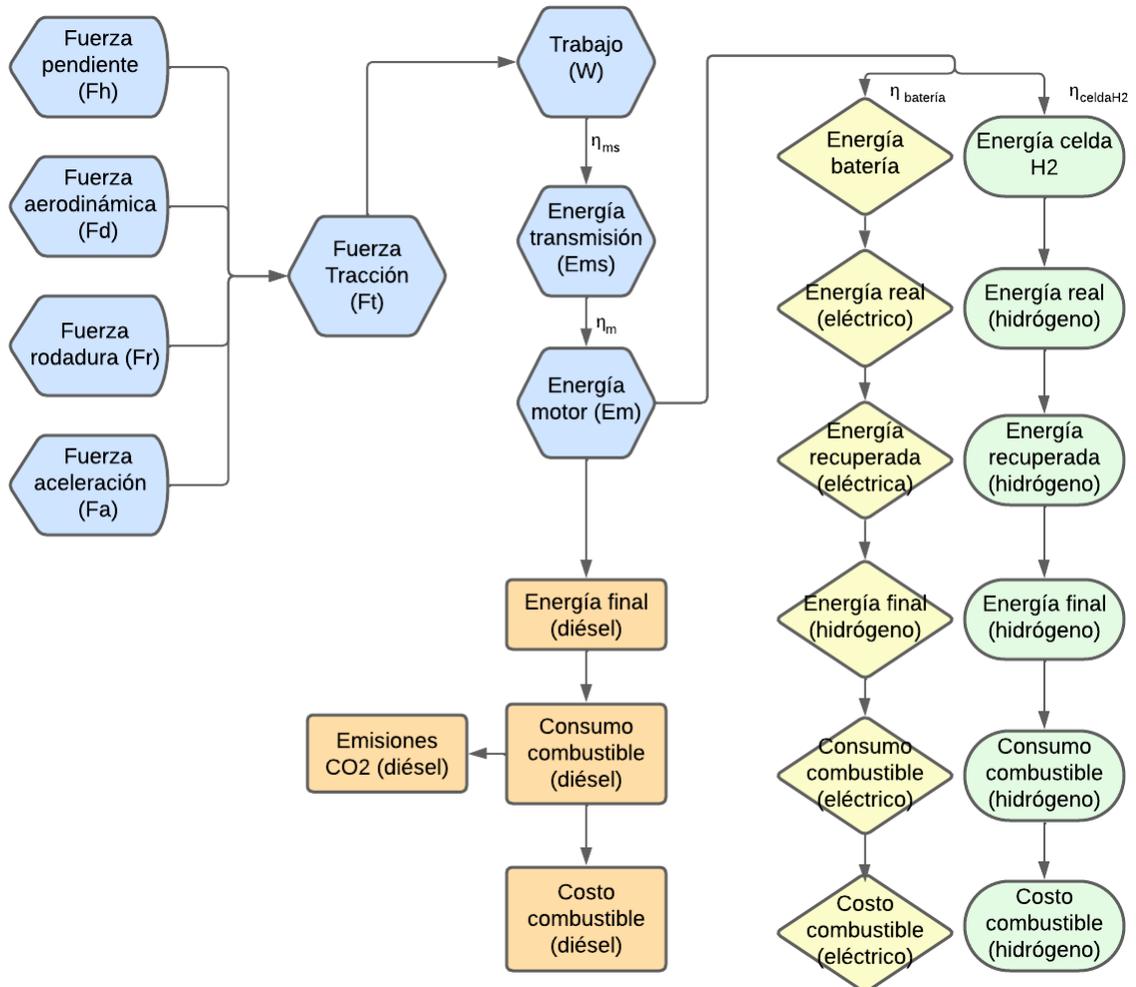


Figura 3.3: Diagrama del proceso del modelamiento físico [Elaboración propia].

Posteriormente, se siguió con la recopilación de datos asociados a los energéticos en si (diésel, hidrógeno, electricidad), estos correspondieron a las densidades energéticas volumétricas [ $kWh/l$ ] y gravimétricas [ $kWh/kg$ ], la densidad del combustible diésel [ $kg/l$ ] y el poder calorífico inferior ( $PCI$ ) [ $kJ/kg$ ] de los tres energéticos (Véase B.3).

Después, se prosiguió con la búsqueda de los distintos tipos de costos que fueron relevantes para la decisión y optimización del modelo en cada escenario. Lo primero fue hallar los costos de combustible de los tres energéticos usados ( $[USD/l]$ ,  $[USD/kgH_2]$ ,  $[USD/kWh]$ ) en 2023 y también proyecciones de estos hasta el horizonte de evaluación definido en 2050 B.11. Luego, se comenzó a investigar sobre los costos de inversión de cada medio de transporte utilizado (camión, bus interurbano y bus urbano) considerando la tecnología utilizada en cada caso (diésel, hidrógeno, electricidad) (Véase B.10). Junto a esto se hallaron los costos correspondientes al precio de la instalación de una estación de recarga de combustible por vehículo ( $USD/veh$ ) (Véase B.9). Cabe notar que para el caso del diésel se hace el supuesto de tener costo de inversión de estación cero, ya que esta tecnología es la actualmente utilizada y desarrollada teniendo las estaciones suficientes a lo largo de los trayectos. Además, que si se desea llegar a ser carbono neutral implementar más estaciones de combustibles que emiten gases de efecto invernadero no ayudarían a acercarse a este objetivo.

Por otro lado, con respecto a los horarios de funcionamiento de los vehículos, se utilizó Moovit para tener la jornada laboral y la frecuencia de los buses de la línea 702 de Valparaíso. Para el caso de los camiones CAEX se utilizó la jornada laboral de una mina promedio y para el caso del bus interurbano se utilizó la información disponible en PUCV [30] y en la web, donde se utilizó la frecuencia de los buses y el horario de operación.

En cuanto a la vida útil de los vehículos, se investigó que los camiones CAEX tienen una vida útil de 15 años [31], mientras que los buses interurbanos alcanzan los 18 años [32] y los minibuses los 17 años [32]. Se supuso finalmente para el cálculo de la anualidad en los tres casos se tiene una vida útil de 15 años.

### 3.3. Cálculos necesarios previo al modelo

Antes de crear el modelo de optimización en GAMS fue necesario calcular datos de entrada directos que el modelo requería. Los tres aspectos fundamentales calculados fueron los ciclos de conducción característicos (distancia de ciclo, tiempo de ciclo y cantidad de ciclos por vehículo y flota) y la obtención del factor de emisiones de GEI equivalente del diésel, que agrupa los tres gases de efecto invernadero más abundantes en el transporte ( $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$ ).

#### 3.3.1. Ciclos de conducción

##### 3.3.1.1. Camión CAEX

El primer paso para obtener el ciclo de conducción fue conseguir la distancia de ciclo del vehículo. Por ello, es que en el contexto de los procesos operativos de los camiones CAEX, se requirieron la consideración y análisis de diversos datos iniciales y supuestos razonables. Estos datos abarcan información necesaria, como la variación de la pendiente en cada tramo de subida y bajada del camión cargado y vacío, la utilización de curvas Rimpull para obtener la velocidad promedio en cada

tramo del camino, así como las diferentes características de los bancos. Estas últimas se refieren a la altura de los taludes que definen los sectores destinados a la explotación o extracción de un rajo [33].

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta las distancias vertical y horizontal de la ruta del mineral, elementos importantes para obtener las distancias reales de la pendiente. También, el diseño del perfil de conducción se ve directamente influenciado por el plan de producción del mineral, así como la disponibilidad de los camiones, impactando directamente en la eficiencia y la fluidez de las operaciones.

Ahora bien, para representar el ciclo y la operación que realiza un camión de estas características en una mina a rajo abierto, existen seis estados mínimos en los cuales los camiones se encuentran durante su funcionamiento. Estos estados son: carga del material (“*loading*”), el transporte cargado (“*hauling*”), maniobras (“*manoeuvring*”), descarga (“*dumping*”), regreso descargado (“*returning*”) y el posicionamiento para volver a cargar el material (“*spotting*”). Dichos estados se pueden apreciar en la imagen 3.4.

El primer supuesto realizado para efectos de este trabajo fue que se despreciaron los estados de (“*spotting*”) y (“*manoeuvring*”) debido a que el tiempo utilizado en estas maniobras de posicionamiento son menores a los demás procesos, con ello a su vez el consumo de combustible y por ende las emisiones contaminantes son menos significantes y varían en menor medida que durante el trayecto en sí del vehículo en pendiente.



Figura 3.4: Esquema general típico de operación de camiones CAEX en mina. Obtenido de [34].

Ahora bien, para este caso de estudio se considera que el camión luego de cargarse sube una cierta pendiente positiva, llega al lugar de descarga en la cima, deja el material y procede a retornar por el mismo camino, pero esta vez se debe tener en cuenta en los cálculos que la pendiente es negativa y el camión va vacío. Esto se aprecia claramente en la imagen 3.5. Además, se hizo el supuesto de que no se consideran eventos externos como la parada y partida del vehículo ante un imprevisto para efectos de los cálculos. Junto con esto, se supuso que, si un camión opera, este lo hará durante los 355 días de operación en el año.

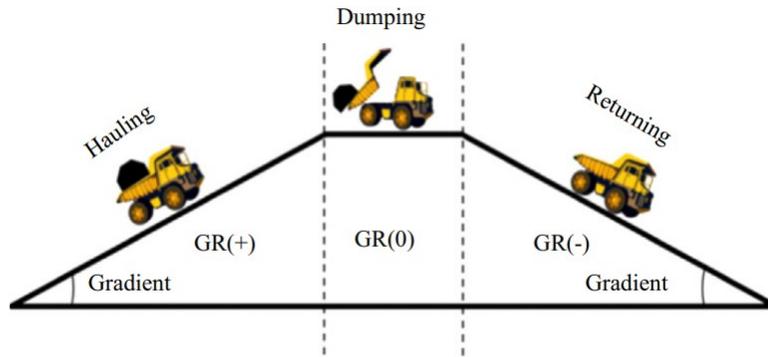


Figura 3.5: Esquema simplificado de tramos relevantes en pendiente. Obtenido de [34].

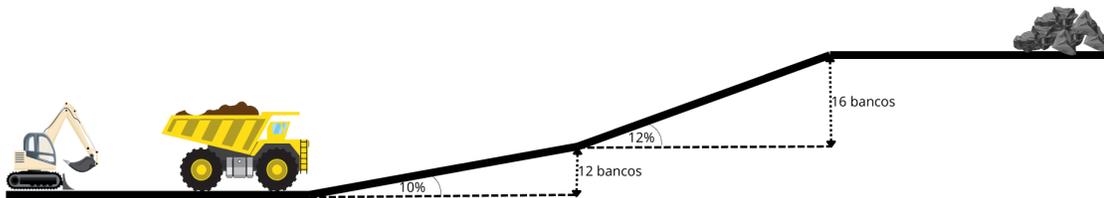


Figura 3.6: Ciclo de conducción estudiado para el camión minero [Elaboración propia].

Y tal como se aprecia en la Figura 3.6 se parte con la premisa de que el camión debe subir una altura de 12 bancos con un gradiente de 10 % y luego 16 bancos con gradiente de 12 % para descargar el material.

Entonces, para obtener la distancia de un ciclo de conducción, se debe calcular la distancia en cada pendiente, esto se hace de la siguiente forma teniendo en consideración dos cosas importantes, la conversión tanto de bancos a metros como de porcentaje en pendiente a grados [35].

$$1 [\text{banco}] = 12 [m] \tag{3.1}$$

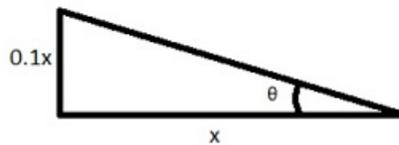


Figura 3.7: Conversión de pendiente en porcentaje [%] a grados [°]. Obtenido de [35].

$$\theta [^\circ] = \arctan\left(\frac{\text{pendiente} [\%] x}{x}\right) \tag{3.2}$$

Una vez con las conversiones realizadas se pueden calcular las distancias en pendiente del trayecto de la siguiente manera, aplicando propiedades trigonométricas, recordando la definición de la función seno se tiene lo siguiente.

Tabla 3.1: Conversiones de datos iniciales de la pendiente del trayecto del camión minero

Variable	Valor	Conversiones
$h_1$	400 [m]	
$v_1$	12 [bancos]	144 [m]
$\theta_1$	10 [%]	$5.71^\circ$
$h_2$	500 [m]	
$v_2$	16 [bancos]	192 [m]
$\theta_2$	12 %	$6.84^\circ$

$$\text{sen}(\theta) = \frac{\text{c.opuesto}}{\text{hipotenusa}} \quad (3.3)$$

$$\text{sen}(\theta_1) = \frac{v_1}{p_1} \quad (3.4)$$

$$\text{sen}(\theta_2) = \frac{v_2}{p_2} \quad (3.5)$$

Luego, se despeja la pendiente en cada caso, se suman y se obtiene la distancia de ida o vuelta. Así que para obtener la distancia de ciclo, se multiplica por 2 ya que se hace el supuesto de que el camión al momento de llegar a la cima deja el material y se devuelve de inmediato. Por ende, la distancia de un ciclo queda.

$$d_{\text{ciclo}} = 2 \cdot (p_1 + p_2) \quad (3.6)$$

A continuación, para el cálculo del tiempo de ciclo en la mina a rajo abierto, lo primero es obtener las velocidades en cada tramo a través de las curvas Rimpull del camión minero junto a la resistencia a la rodadura del vehículo. Se utilizan dos curvas Rimpull distintas dependiendo si el camión va en subida o en bajada. En la Figura 3.9 se muestran ambas curvas y el procedimiento para la obtención de la velocidad es la siguiente.

En primer lugar, hay que posicionarse en el lado derecho de la gráfica y si se trata del tramo en subida la pendiente efectiva es la suma entre la pendiente más la resistencia a la rodadura. Desde ese punto se traza una línea recta en dirección al origen del sistema coordenado hasta intersectar con la línea segmentada vertical derecha que indica que el camión va completamente cargado. En este punto se traza una línea horizontal hacia la izquierda en dirección a la fuerza de tracción (que se ubica en el eje vertical del sistema coordenado) hasta intersectar con la curva azul (que corresponde a las marchas del vehículo). Finalmente, desde esta última intersección se traza una línea vertical hacia abajo hasta llegar a la línea horizontal del sistema coordenado que corresponde a la velocidad recomendada que debe utilizar el camión con dicha carga en subida.

Para el caso del tramo en bajada el procedimiento es similar, sólo hay que tener las siguientes consideraciones. La pendiente efectiva en este caso es la resta entre la pendiente y la resistencia a la rodadura (ya que el vehículo va en bajada). El segundo cambio a tener en cuenta es que la línea que se traza desde la “*Total Resistance*” hacia el origen debe intersectar con la línea vertical segmentada

central que corresponde a cuando el camión va sin carga alguna. Y la tercera diferencia es que la siguiente línea horizontal que sale desde la línea segmentada va hacia la derecha hasta intersectar con la curva roja. Esto se puede apreciar en la Figura 3.9.

Cabe destacar que debido a precauciones en la mina y para mejorar la maniobrabilidad es recomendado disminuir la velocidad incluso a la mitad de lo que resulta en la curva Rimpull en bajada.

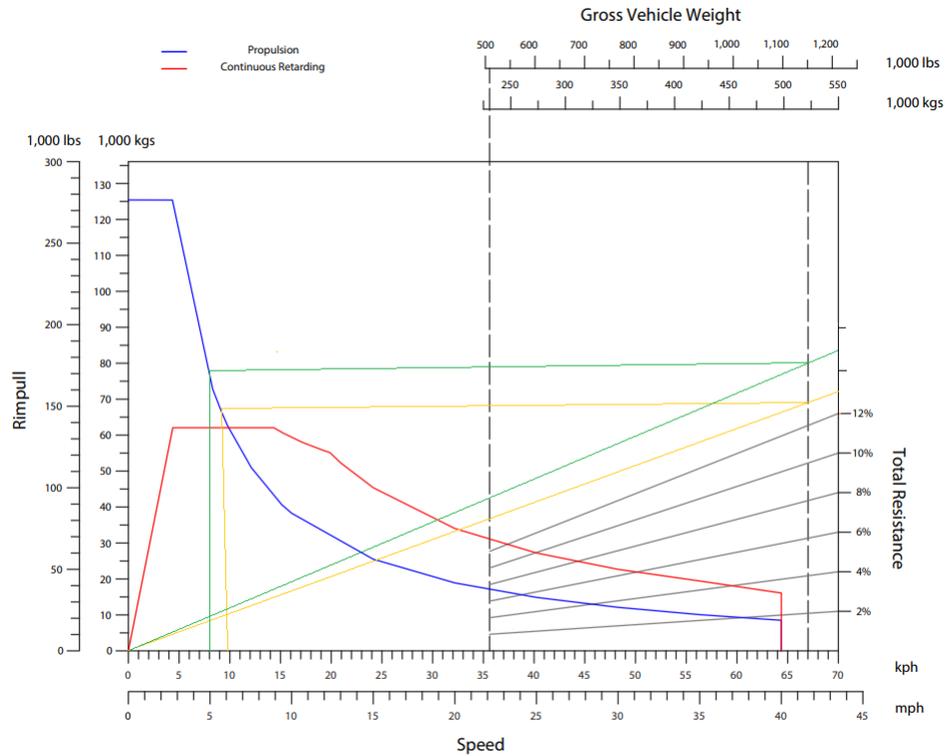


Figura 3.8: Curva Rimpull para pendiente en subida [36].

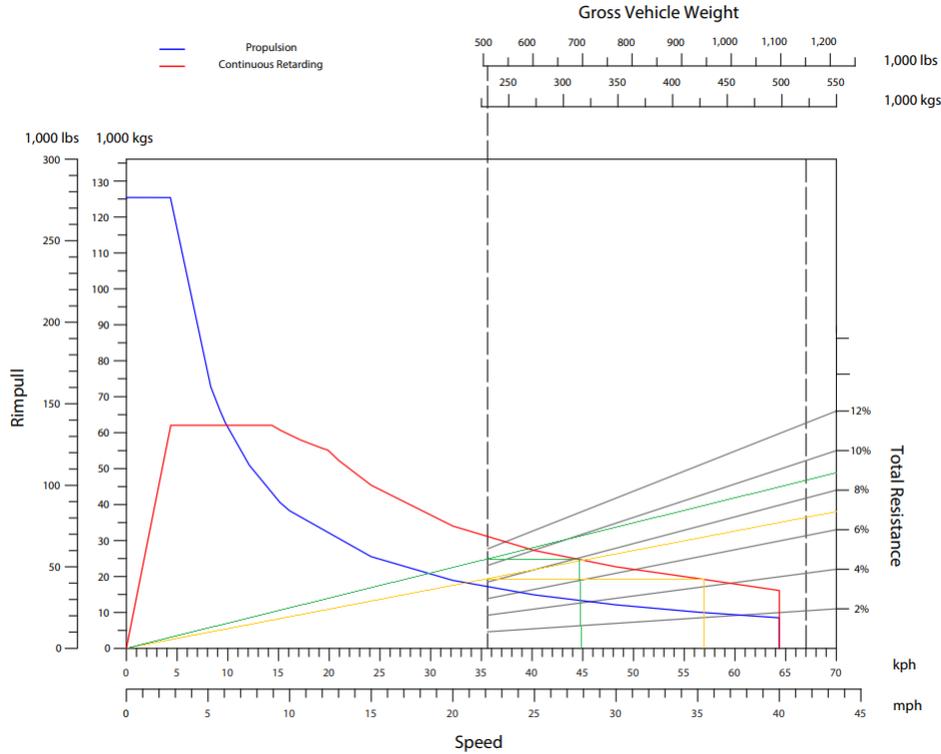


Figura 3.9: Curva Rimpull para pendiente en bajada [36].

Ahora bien, con las velocidades obtenidas se procede a calcular el tiempo de ciclo del camión, el cual viene dado por la ecuación 3.7.

$$t_{ciclo} = t_{carga} + t_{ida} + t_{vuelta} + t_{descarga} \quad (3.7)$$

El tiempo de carga y descarga es conocido y los tiempos de ida y vuelta se calculan según la ecuación 3.8 dividiendo la distancia del tramo en la velocidad promedio que lleva en dicho tramo.

$$t = \frac{d}{v} \quad (3.8)$$

$$t_{ida} = \frac{p_1}{v_1} \quad (3.9)$$

$$t_{vuelta} = \frac{p_2}{v_2} \quad (3.10)$$

A continuación, antes de obtener los ciclos que un camión CAEX puede realizar al año, es necesario hacer un dimensionamiento de la flota necesaria según el plan de producción del mineral supuesto. Sabiendo la carga máxima que puede transportar por viaje, la jornada laboral de trabajo, el tiempo de ciclo y los días efectivos trabajados al año, se realizó regla de tres y se obtuvo la ecuación 3.11 para poder calcular la carga que puede hacer el camión al año.

$$Carga\ anual_{CAEX} = \frac{Carga\ max_{CAEX}[ton] \cdot Jornada\ laboral[h]}{t_{ciclo}[h]} \cdot 355 \left[ \frac{días}{año} \right] \quad (3.11)$$

Luego, la cantidad de camiones iniciales mínimos para cumplir con la cantidad total de mineral según el plan de producción anual y la disponibilidad supuesta de cada camión viene dado por:

$$N^{\circ} \text{camiones} = \frac{\text{Plan Producción}[\text{ton}]}{\text{Carga anual}_{CAEX}[\text{ton}]} \cdot \text{Disponibilidad}[\%] \quad (3.12)$$

Luego, se procedió a calcular la cantidad de distancia recorrida por un camión en un año laboral (recordando el supuesto de 355 días trabajados). DE forma similar a como se obtuvo la carga anual, en este caso se multiplicó la distancia de un ciclo por la jornada laboral, esto se dividió en el tiempo de ciclo y se multiplicó por los días trabajados al año.

$$\text{Distancia anual}_{CAEX} = \frac{d_{\text{ciclo}}[\text{km}] \cdot \text{Jornada laboral}[\text{h}]}{t_{\text{ciclo}}[\text{h}]} \cdot 355 \left[ \frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \quad (3.13)$$

Después se tomó este resultado y se dividió entre la distancia de un ciclo, con ello se obtuvo la cantidad de ciclos máximos anuales que puede efectuar un camión y en consecuencia se logró conseguir los ciclos máximos que pueden hacer toda la flota al multiplicar la ecuación 3.14 por el número de camiones iniciales de la flota.

$$\text{Ciclos anual}_{CAEX} = \frac{\text{Distancia anual}_{CAEX}[\text{km}]}{d_{\text{ciclo}}[\text{km}]} \quad (3.14)$$

### 3.3.1.2. Bus interurbano Santiago - Valparaíso

Para este segundo caso de estudio el procedimiento para obtener la distancia de ciclo y tiempo de ciclo es más simple que el caso anterior. En primer lugar, la ruta se obtuvo directamente al simularla en Google Maps con bastante exactitud, en donde el punto de inicio fue el Terminal de buses Pajaritos ubicado en la comuna de Lo Prado, región Metropolitana, y el punto de término fue en el Terminal Rodoviario de Valparaíso, de la comuna y región de Valparaíso.

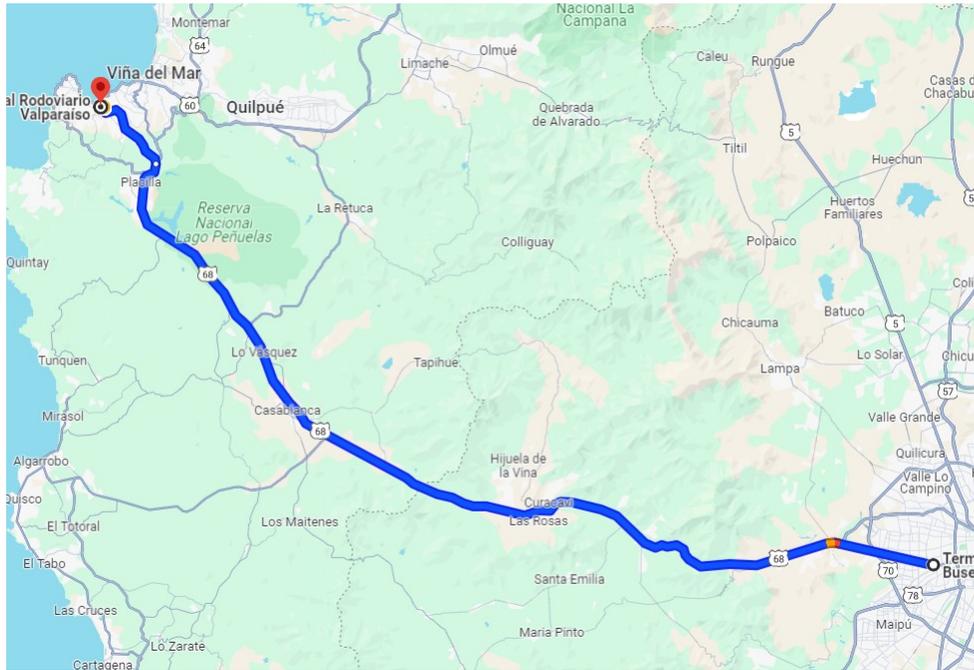


Figura 3.10: Recorrido del bus interurbano Santiago - Valparaíso [37].

Entonces, luego de conocer la ruta tanto de ida como de vuelta, que es prácticamente la misma de ida pero en sentido inverso, se utilizó Google Earth para dibujar dicha ruta desde el inicio del Terminal de buses Pajaritos hasta el Terminal Rodoviario de Valparaíso, con el fin de obtener en primer lugar, el perfil de elevación, el cual sirvió para conocer la pendiente máxima, mínima y promedio durante todo el trayecto y también se consiguió la distancia recorrida en el trayecto de ida, vuelta y con ello la distancia de recorrido de un ciclo.

Cabe notar que cuando se estaba haciendo la ruta en Google Earth, esta atraviesa dos cerros por medio de túneles, en primer lugar el túnel Lo Prado y más adelante el túnel Zapata. Debido a esto y por las limitantes del programa se supuso una pendiente 0% en dichos túneles realizando una línea recta desde el comienzo del túnel hasta su salida. Esto se hizo debido a que, si se seguía la trayectoria hasta la salida del túnel en cuestión con la herramienta de medición de ruta de Google Earth, este tomaba la distancia y pendiente del cerro en el que se encontraba como si se recorriera por su superficie y no por su interior. Es por ello que para este segundo caso se subdividieron las rutas en cinco tramos.

- 1er tramo: Terminal de buses Pajaritos - Túnel Lo Prado
- 2do tramo: Túnel Lo Prado
- 3er tramo: Túnel Lo Prado - Túnel Zapata
- 4to tramo: Túnel Zapata
- 5to tramo: Túnel Zapata - Terminal Rodoviario de Valparaíso

Cabe destacar que en los tramos 1, 3 y 5 se obtuvo el perfil de elevación requerido. Luego, como se modelaron cuatro tramos en el modelo de optimización ( $a$  y  $b$  para el trayecto de ida, mientras que  $c$  y  $d$  para el trayecto de vuelta) se reagruparon de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
a &= 1er\ tramo + 2do\ tramo + 3er\ tramo \\
b &= 4to\ tramo + 5to\ tramo \\
c &= b \\
d &= a
\end{aligned}$$

En donde, se utilizó la pendiente máxima de los tres primeros tramos para usar en  $a$  y la pendiente máxima entre los tramos 4 y 5 para usar en el tramo  $b$ . Mientras que para la distancia solo se sumó la distancia respectiva en cada tramo.

$$d_{cicloBUS} = d_a + d_b + d_c + d_d \quad (3.15)$$

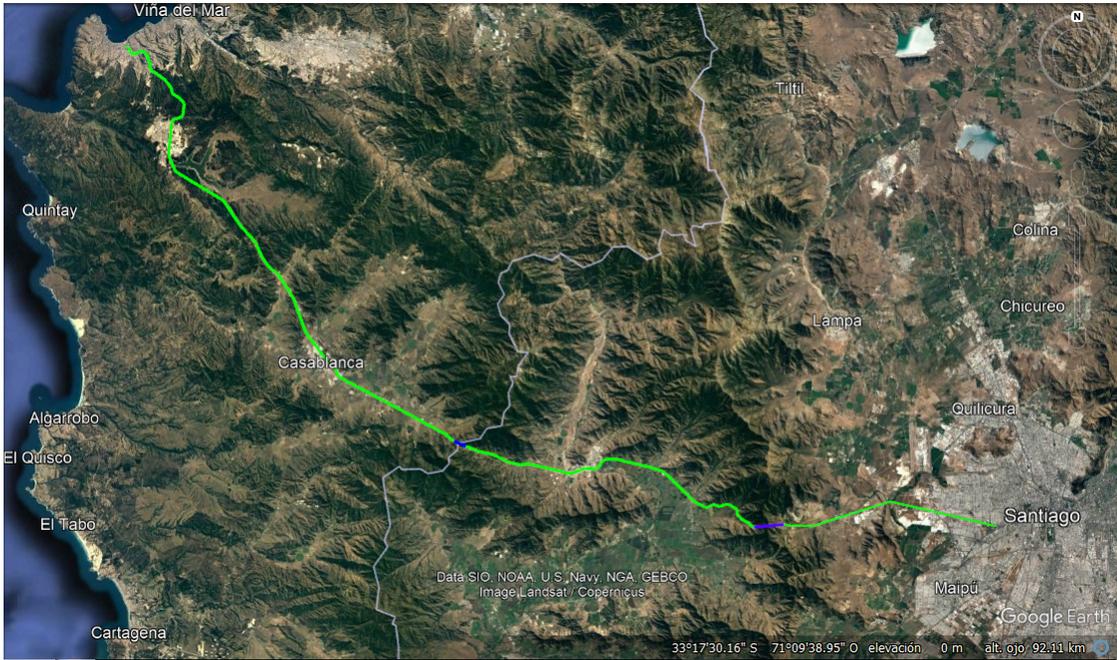


Figura 3.11: Ciclo del recorrido del bus interurbano Santiago - Valparaíso.

Después, el tiempo de viaje de ida o vuelta se obtuvo primeramente de Google Maps, pero debido a que esta aplicación realiza el cálculo y predicción en base a un automóvil de menor tamaño (el cual demora menos tiempo en movilizarse) se corroboró con información de bibliografía y guías asociadas al recorrido, el cual resultó ser de 1 hora 30 min en promedio [38]. Junto a esto, para obtener el tiempo de ciclo se supuso un tiempo de carga/descarga de maletas y pasajeros de 30 [min] al partir o llegar a cada terminal el cual se sumó a los tiempos de ida y vuelta.

$$t_{cicloBUS} = t_{carga} + t_{ida} + t_{vuelta} + t_{descarga/carga} \quad (3.16)$$

Luego, como se obtuvo el dato de que un bus sale cada 20 min del terminal [30], es decir, salen 3 buses cada hora y el tiempo de salidas en el día es de 7:20 a 21:50 horas, se pudo calcular la cantidad

de buses que salen al día siendo aproximadamente 44 buses. Esto no quiere decir que la flota para este recorrido sea esa, ya que los buses vuelven mínimo 3 veces al día, por ende, a modo de corroborar de acuerdo a datos de transporte público de abril de 2021 de la Subsecretaría de Transportes regresan al terminal de Lo Prado 23 buses interurbanos para esta ruta. Por ende, se utilizó dicha cantidad para obtener la cantidad de ciclos máximos que puede hacer el bus al día y los ciclos de la flota al año. El procedimiento es el mismo que para el caso del camión CAEX.

$$Distancia\ anual_{BUS} = \frac{d_{ciclo_{BUS}}[km] \cdot Jornada\ laboral[h]}{t_{ciclo_{BUS}}[h]} \cdot 365\left[\frac{días}{año}\right] \quad (3.17)$$

$$Ciclos\ anual_{BUS} = \frac{Distancia\ anual_{BUS}[km]}{d_{ciclo_{BUS}}[km]} \quad (3.18)$$

Finalmente, un dato necesario para el modelo es la velocidad promedio a la que va el bus interurbano en su trayecto, para ello se dividió la distancia total de ida en el tiempo que demora en llegar desde que sale del terminal de buses Pajaritos y llega al terminal Rodoviario de Valparaíso.

$$v_{ida} = \frac{d_{ida}}{t_{ida}} \quad (3.19)$$

### 3.3.1.3. Bus urbano Línea 702 - Valparaíso

Para hallar el ciclo de conducción en este tercer caso de estudio, lo primero que se realiza es la búsqueda real de la ruta de la línea 702 de Valparaíso, para ello se utilizó el sitio/aplicación Moovit el cual dispone de una basta variedad de rutas urbanas por región.

Si bien la distancia total recorrida es especificada por Moovit junto a la cantidad de paradas, faltaba la pendiente máxima en el recorrido. Por ende, de igual forma que en el caso del bus interurbano anterior se recreó la trayectoria de ida y vuelta con Google Earth. Con este sistema se información geográfica se obtuvo entonces la distancia total del recorrido en [km] y también la pendiente máxima, mínima y promedio. Cabe notar que el tramo al igual que antes también se separa en cuatro, dos tramos para la ida ( $a$  y  $b$ ) y dos tramos para la vuelta ( $c$  y  $d$ ), para seguir en concordancia con la programación que se hizo en el modelo.

Por otro lado, el tiempo estimado de viaje se obtiene de Moovit y también del estudio realizado por la Subsecretaría de Transporte "*Mediciones de demanda en servicios de transporte público urbano mayor de gran Valparaíso*" [39]. De este último informe también es posible obtener datos como la velocidad promedio medida en los trayectos de ida y vuelta, el horario laboral de trabajo y la frecuencia de buses.

Luego, la cantidad inicial de la flota de minibuses se obtuvo a partir de datos de la Subsecretaría de Transportes a fecha abril 2021. La agencia de transporte de pasajeros Top Sur S.A. dispone de 147 buses en total, además esta agencia posee 6 líneas de recorridos dentro de los cuales se encuentra la línea 702. Entonces, para obtener la cantidad inicial de la flota se dividió la cantidad total disponible (147) en la cantidad de recorridos (6), en donde se llegó al supuesto de que la línea 702 posee 25 vehículos aproximadamente [40].

Junto a esto se procedió a calcular la distancia recorrida en un año por el minibús de la misma

forma que en el caso anterior, es decir, con la distancia recorrida en un ciclo, el tiempo de ciclo y las horas laborales (ecuación 3.20).

Con este resultado también fue posible calcular los ciclos que realiza el minibus urbano en un día y en un año, al igual que antes se realiza nuevamente la ecuación 3.21.

$$Distancia\ anual_{L702} = \frac{d_{ciclo_{L702}}[km] \cdot Jornada\ laboral[h]}{t_{ciclo_{L702}}[h]} \cdot 365\left[\frac{días}{año}\right] \quad (3.20)$$

$$Ciclos\ anual_{L702} = \frac{Distancia\ anual_{L702}[km]}{d_{ciclo_{L702}}[km]} \quad (3.21)$$

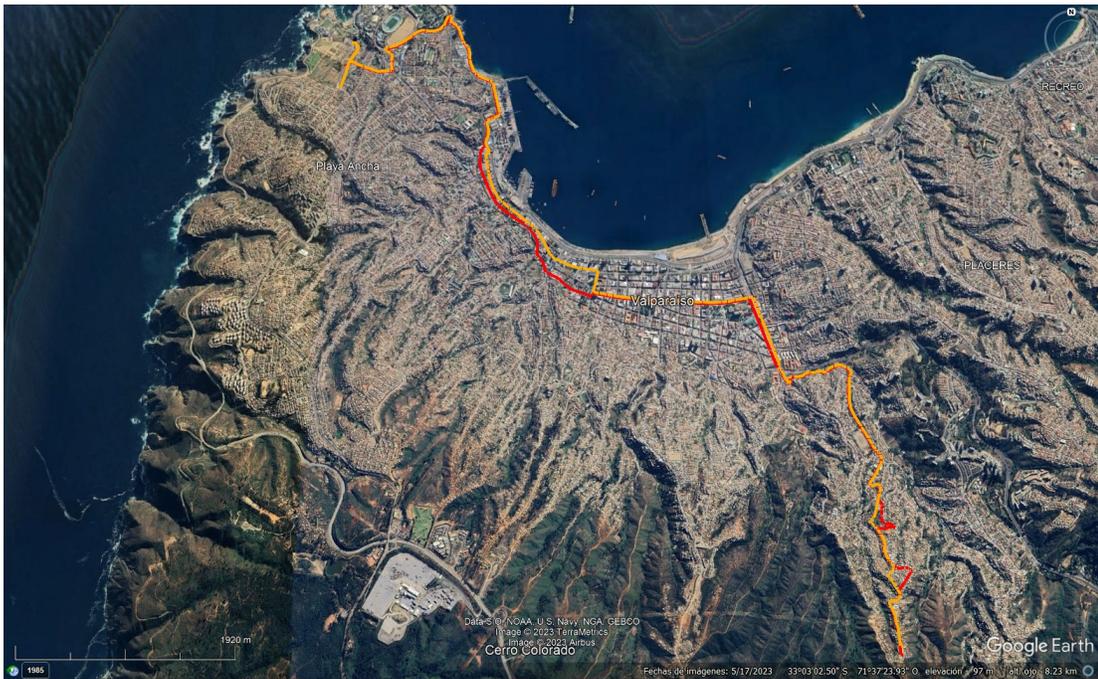


Figura 3.12: Ciclo del recorrido línea 702.

### 3.3.2. Requerimientos de energía del vehículo

Se realizó un análisis de energía, en donde en primer lugar se debió calcular la fuerza que necesita el vehículo para moverse. Es por ello entonces que se realizó un equilibrio de fuerzas sobre un vehículo estándar, en donde, las cuatro fuerzas principales que el motor del vehículo debe superar para desplazarse longitudinalmente son la fuerza de resistencia en pendiente ( $F_h$ ), fuerza de resistencia a la rodadura ( $F_r$ ), fuerza de resistencia aerodinámica ( $F_d$ ) y fuerza de resistencia a la aceleración ( $F_a$ ). Y producto de la suma de estas fuerzas se obtuvo la fuerza total de tracción del vehículo ( $F_t$ ) necesaria para desplazarse. A continuación, se observan las cuatro fuerzas implicadas.

$$F_h = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.22)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3.23)$$

$$F_r = f \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (3.24)$$

$$F_a = \delta \cdot m \cdot a \quad (3.25)$$

$$F_t = F_h + F_r + F_d + F_a \quad (3.26)$$

En donde:

- $m$  es la masa del vehículo [ $kg$ ].
- $g$  es la aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ].
- $\theta$  es la pendiente o ángulo del trayecto [ $^\circ$ ].
- $f$  es el coeficiente de resistencia a la rodadura.
- $\rho$  es la densidad del aire.
- $A$  es el área efectiva frontal del vehículo [ $m^2$ ].
- $C_d$  es el coeficiente de resistencia aerodinámica del vehículo.
- $v$  es la velocidad del vehículo [ $m/s$ ].
- $\delta$  es el coeficiente inercial relacionado al vehículo.
- $a$  es la aceleración del vehículo [ $m/s^2$ ].

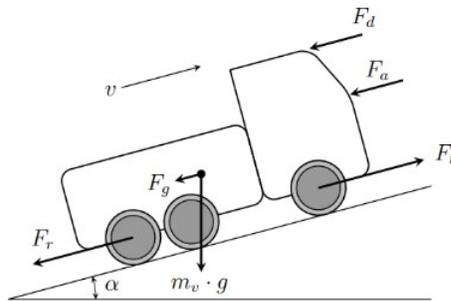


Figura 3.13: Diagrama de cuerpo libre de un vehículo pesado en pendiente.

Cabe destacar que se hicieron los siguientes supuestos con respecto a la masa que se utilizó en el cálculo de fuerzas. En primer lugar, para el caso del camión CAEX se utilizó la masa completa del vehículo, es decir, cuando el camión va totalmente cargado durante los tramos de pendiente positiva en subida, mientras que en la vuelta para la bajada se utilizó el peso bruto del camión. En el caso de los buses interurbanos se supuso que tanto como en el viaje de ida como en la vuelta del recorrido del bus este va a su máxima capacidad de pasajeros, por ende, se le suma la cantidad correspondiente de 44 pasajeros con un peso promedio de 70 [ $kg$ ] al peso bruto del bus. Mientras que para los buses urbanos de la línea L702 la cantidad de pasajeros varía a lo largo del trayecto debido a que en cada

parada pueden subir o bajar pasajeros, para la masa tanto para el viaje de ida como de vuelta del recorrido se toma la masa promedio de este, es decir, el promedio entre la masa del bus sin ningún pasajero y la masa del bus a su máxima capacidad de 24 pasajeros, también se supone que cada pasajero pesa en promedio 70 [kg].

En cuanto al cálculo de la aceleración, se tuvo que suponer que el vehículo acelera durante los primeros 200 [m] en el caso de los CAEX y luego mantiene una velocidad promedio constante en un mismo tramo.

Luego, se multiplicó la fuerza total de tracción obtenida con la distancia recorrida en cada tramo del trayecto, en donde se consiguió el trabajo o energía requerida por el vehículo y a partir de este trabajo se pudieron desprender las energías asociadas a la transmisión, motor, baterías y celda de combustible. Estas energías asociadas surgen debido a que en cada proceso hay cierta pérdida de energía y es por ello que cada componente posee su respectiva eficiencia al transmitirla. A continuación, se detallan las ecuaciones requeridas y utilizadas para ello.

$$W = E_t = F_t \cdot D_{tramo} \quad (3.27)$$

$$E_{ms} = \frac{1}{\eta_T} \cdot W \quad (3.28)$$

$$E_m = \frac{1}{\eta_{motor}} \cdot E_{ms} \quad (3.29)$$

$$E_{bateria} = \frac{1}{\eta_{bateria}} \cdot E_m \quad (3.30)$$

$$E_{celdaH_2} = \frac{1}{\eta_{celdaH_2}} \cdot E_m \quad (3.31)$$

En donde:

- $W$  es el trabajo o energía requerida por las ruedas del vehículo para moverse [ $J$ ].
- $E_{ms}$  es la energía asociada a la transmisión de esta entre el motor y las ruedas [ $J$ ].
- $E_m$  es la energía requerida motor eléctrico [ $J$ ].
- $E_{bateria}$  es la energía que entrega el sistema (batería) al motor [ $J$ ].
- $E_{celdaH_2}$  es la energía que entrega el sistema (celda de combustible de hidrógeno) al motor [ $J$ ].
- $D_{tramo}$  es la distancia recorrida por el vehículo en un cierto tramo del recorrido [ $m$ ].
- $\eta_T$  es la eficiencia asociada a la transmisión desde el motor eléctrico hasta las ruedas.
- $\eta_{motor}$  es la eficiencia del motor.
- $\eta_{bateria}$  es la eficiencia asociada a la batería eléctrica del vehículo.
- $\eta_{celdaH_2}$  es la eficiencia asociada a la celda de combustible de hidrógeno.

Entonces, de lo anterior se infirió que la energía real que necesita el vehículo será la mayor de las calculadas previamente, es decir, de donde proviene y se genera la energía. En el caso de los vehículos

diésel su energía real será  $E_{real} = E_m$  ya que no poseen batería ni celda de combustible. Para vehículos eléctricos su  $E_{real} = E_{batería}$  y para los vehículos a hidrógeno su  $E_{real} = E_{celdaH_2}$

Finalmente, para el caso de los vehículos eléctricos a batería y con celda de combustible de hidrógeno pueden ser competitivos en cierto modo debido a que estos sistemas pueden recuperar cierta parte de la energía cinética que llevan al momento de frenar. Por ende, en el modelo se incorporó la utilización de la energía recuperada en estos sistemas, la cual se calculó de la siguiente manera.

$$E_{recuperada} = \eta_{batería} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_T \cdot \eta_{recuperación} \cdot \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_0^2) \quad (3.32)$$

De esta última expresión 3.32, en cuanto a la velocidad final en la recuperación de energía se supuso que el delta de velocidad no debía ser tan elevado, de modo que se recupere entre un 40 % y 60 % de la energía que gasta el vehículo en total.

### 3.4. Emisiones de $CO_2$

Para poder realizar el cálculo de las emisiones de  $CO_2$  de cada vehículo contaminante en el modelo, es necesario definir un factor de emisión de  $CO_2eq$  que considere también otros gases contaminantes como el  $CH_4$  y el  $N_2O$ . En primer lugar, se recopilieron datos importantes, como el FPCI (Factor de Poder Calorífico Inferior), el FGEI (Factor de Gases de Efecto Invernadero) y el FE (Factor de Emisión), específicos para cada tipo de combustible (diésel, hidrógeno, electricidad). Estos factores se multiplicaron por su respectivo factor de emisión de GEI para obtener un factor de emisión expresado en  $[kgCO_2/TJ]$ .

Posteriormente, para cada tipo de combustible (en este caso, solo el diésel emite, debido al supuesto realizado que no se considerará los gases contaminantes durante la producción del energético), se sumaron las emisiones resultantes, obteniendo así la cifra total de  $CO_2eq$ . Para simplificar la conversión, se aprovechó la relación  $1[TJ] = 10^9[kJ]$  y la densidad del diésel de  $10,3[kWh]$ , permitiendo así la expresión final de las emisiones en  $kgCO_2eq$ . Este proceso garantiza un cálculo más preciso y detallado de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que no solo se considera el  $CO_2$  como único contaminante importante.

### 3.5. Modelo de optimización

El enfoque de optimización se centra en la minimización de costos, con el objetivo de seleccionar la alternativa tecnológica más eficiente en términos de inversión y operación. La metodología busca identificar la combinación óptima de variables y parámetros, de manera que se logre una gestión eficaz y rentable. Este proceso de optimización se desarrolla con el fin de tomar decisiones informadas que conduzcan a la elección de soluciones tecnológicas que no solo reduzcan los costos asociados, sino que también maximicen la eficiencia y se realice la transición energética reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

### 3.5.1. Conjuntos de datos

A continuación, se crearon los siguientes subíndices a modo de recurrir a los distintos datos que se requieren en las ecuaciones del modelo, es decir, estos *sets* están definidos para representar diferentes categorías dentro del modelo de transporte.

- i: transporte
- k: tipo de transporte
- j: tipo de energético
- d: demanda
- m: tramo de la pendiente
- t: año
- ccomb(j): costo de combustibles
- ccinv(i): costo de inversión

### 3.5.2. Parámetros

- $F_{h_{i,k,d,m,t}}$ : fuerza en pendiente.
- $F_{r_{i,k,d,m,t}}$ : fuerza de resistencia a la rodadura.
- $F_{d_{i,k,d,m,t}}$ : fuerza aerodinámica.
- $F_{a_{i,k,d,m,t}}$ : fuerza de aceleración o inercial.
- $F_{total_{i,k,d,m,t}}$ : fuerza total de tracción.
- $W_{total_{i,k,d,m,t}}$ : trabajo o energía resultante.
- $E_{ms_{total_{i,k,d,m,t}}}$ : energía de la transmisión.
- $E_{m_{total_{i,k,d,m,t}}}$ : energía del motor.
- $E_{batería_{total_{i,k,d,m,t}}}$ : energía de la batería.
- $E_{celdaH2_{total_{i,k,d,m,t}}}$ : energía de la celda de combustible de hidrógeno.
- $E_{real_{i,k,d,m,t}}$ : energía real requerida por el vehículo, luego de considerar las pérdidas de energía entre los componentes del vehículo diésel, hidrógeno o eléctrico.
- $E_{recuperada_{i,k,d,m,t}}$ : energía recuperada debido al sistema de regeneración de energía en vehículos hidrógenos y eléctricos al momento de frenado.
- $E_{final_{i,k,d,m,t}}$ : energía final producto de la suma entre la energía real y la energía recuperada.
- *Tasa descuento*: tasa de interés para calcular el valor presente de ingresos futuros.
- $Factor(t)$ : factor de la tasa de descuento.
- *Vida útil*: período o tiempo de servicio del vehículo.
- *Factor anualidad*: anualidad o renta a partir de la tasa de descuento y la vida útil.
- $año_{inicio}$ : año de inicio del análisis.
- $año_{fin}$ : año final del análisis.
- $año(t)$ : función que devuelve el año correspondiente al índice  $t$  para el cálculo de anualidad.
- $veh_{estación}$ : cantidad de vehículos que soporta cada estación.

### 3.5.3. Variables de decisión

- $X_{i,k,j,t}$ : cantidad de viajes realizados por vehículo de tipo  $i$  por tipo de transporte  $k$  con energético  $j$  en año  $t$ .
- $Q_{i,t}$ : cantidad de vehículos del tipo  $i$  en año  $t$  [ $Z_0^+$ ].
- $N_{i,j,t}$ : cantidad de estaciones de carga por vehículo de tipo  $i$  con energético  $j$  en año  $t$  [ $Z_0^+$ ].

### 3.5.4. Variables

- $cons_{comb_{i,k,j,d,t}}$ : Consumo de combustible a partir de la cantidad de ciclos del vehículo y de la energía necesaria para ponerse en movimiento (junto a características intrínsecas del motor y combustible utilizado).
- $c_{opex}$ : Costos operativos totales, a partir del costo del combustible, la distancia recorrida y la eficiencia energética para cada caso.
- $c_{capex}$ : Costos de inversión, a partir de la cantidad de vehículos el costo de inversión de cada uno.
- $c_{carga}$ : Costo de estaciones de carga de combustible.
- $c_{total}$ : Costo total.

### 3.5.5. Función objetivo

El objetivo del modelo es minimizar la función ( $c_{total}$ ) que se definió como la suma de los costos operativos ( $c_{opex}$ ), los costos de inversión o capital ( $c_{capex}$ ) y los costos de las estaciones de carga ( $c_{carga}$ ).

$$\text{Minimizar } \{c_{total} = c_{opex} + c_{capex} + c_{carga}\} \quad (3.33)$$

Entonces, para encontrar los valores óptimos de las variables que minimizan esta función, se definieron las siguientes restricciones.

### 3.5.6. Restricciones

1. Cumplimiento de la demanda anual:

Esta restricción garantiza que la suma de los viajes de cada vehículo y tipos de transporte (flota) sea igual a la cantidad de viajes ( $n$ ) o recorridos en un año (demanda), es decir, la cantidad de viajes que realiza la flota de vehículos de cierto tipo en un año.

$$\sum_{i,k,j} X_{i,k,j,t} = n \quad (3.34)$$

2. Cantidad de viajes máxima por vehículo:

Esta restricción vincula la cantidad de viajes ( $X_{i,k,j,t}$ ) con la cantidad máxima permitida de viajes ( $n_q$ ) en un año por la cantidad de vehículos ( $Q_{i,t}$ ). Asegura que no se excedan los límites de viajes para cada vehículo.

$$X_{i,k,j,t} \leq Q_{i,t} \cdot n_q \quad (3.35)$$

3. Cantidad de vehículos el primer año:

Esta restricción establece la cantidad inicial de vehículos el primer año. Es importante para iniciar el modelo tener una cierta cantidad de vehículos disponibles.

$$Q_{i,t_0} = \text{Cantidad Inicial}_i \quad (3.36)$$

4. Crecimiento de la cantidad de vehículos:

Garantiza que la cantidad de vehículos crezca con el tiempo ( $t$  a  $tt$ ) si es necesario. Esto es útil para modelar el crecimiento de la flota de vehículos a lo largo de los años.

$$Q_{i,t+1} - Q_{i,t} \geq 0 \quad (3.37)$$

5. Límite de pmax:

Sirve para evitar que cierto tipo de tecnología se implemente en un año cambiando completamente la flota de vehículos, en los casos que se sabe que dicha tecnología no está aún desarrollada y es imposible que se implemente en grandes cantidades. De modo que permita el crecimiento de la flota y cambio de tecnología de forma gradual y no abrupta.

$$Q_{i,t} \leq p_{max_{i,t}} \quad (3.38)$$

6. Límite de pmax para estaciones:

Esta restricción tiene el mismo principio de funcionamiento que la anterior, solo que ahora se limita la cantidad de estaciones en un año y no la cantidad de vehículos.

$$N_{i,j,t} \leq p_{max_{i,j,t}} \quad (3.39)$$

7. Cantidad estación de carga:

Esta restricción indica que la cantidad de estaciones de carga ( $N_{i,j,t}$ ) para un vehículo de tipo  $i$  con energético  $j$  en un año  $t$ , debe ser mayor a la cantidad de vehículos dividido en la capacidad que tiene la estación.

$$N_{i,j,t} \geq \frac{Q_{i,t}}{veh_{estación}} \quad (3.40)$$

8. Cantidad estación de carga 2:

Esta restricción es similar a la anterior pero sirve para restringir que la cantidad de estaciones tome un valor entero dentro de un rango.

$$N_{i,j,t} \leq \frac{Q_{i,t}}{veh_{estación}} + 1 \quad (3.41)$$

9. Crecimiento de la cantidad de vehículos:

Garantiza que la cantidad de estaciones de carga crezcan con el tiempo ( $t$  a  $tt$ ) si es necesario. Esto es útil para modelar el crecimiento de las estaciones de carga a lo largo de los años si es que la flota aumenta.

$$N_{i,j,t+1} - N_{i,j,t} \geq 0 \quad (3.42)$$

10. Consumo de combustible:

Consumo de combustible a partir de la cantidad de ciclos del vehículo y de la energía necesaria para ponerse en movimiento (junto a características intrínsecas del motor y combustible utilizado).

Para el caso de vehículos diésel se utiliza la ecuación 3.43.

$$Consumo_{comb_{i,k,j,d,t}}[l] = \frac{E[kJ] \cdot X_{i,k,t}}{PCI_{comb}[\frac{kJ}{kg}] \cdot \delta_{comb}[\frac{kg}{l}]} \quad (3.43)$$

Para el caso de vehículos con celda de combustible se utiliza la ecuación 3.44.

$$Consumo_{comb}[kg] = \frac{E[kJ] \cdot X_{i,k,t}}{\delta_{grav}[\frac{kWh}{kg}]} \cdot \frac{1[kWh]}{3600[kJ]} \quad (3.44)$$

Mientras que para vehículos eléctricos se utiliza la ecuación 3.45.

$$Consumo_{comb_{i,k,j,d,t}}[kWh] = E[kJ] \cdot X_{i,k,t} \cdot \frac{1[kWh]}{3600[kJ]} \quad (3.45)$$

#### 11. Restricción de límite de emisiones:

Esta restricción garantiza que las emisiones totales de  $CO_2$  no excedan un límite deseado.

$$LimEmisiones[\frac{tonCO_2}{año}] \geq \sum_{i,k} Emi_j[\frac{kgCO_{2eq}}{l}] \cdot \frac{1[ton]}{1000[kg]} \cdot Consumo_{comb}[l] \quad (3.46)$$

#### 12. Costos de operación:

Calcula los costos de operación ( $c_{opeax}$ ) definidos por el consumo de combustible del vehículo en cuestión, el costo de dicho combustible y el factor de la tasa de descuento.

$$c_{opeax} = \min_{i,j,k,d,ccomb,t} \sum Consumo_{comb}[l/kg/kWh] \cdot c_{comb_j}[\frac{USD}{l/kg/kWh}] \cdot factor(t) \quad (3.47)$$

#### 13. Costos de inversión:

Calcula los costos de inversión ( $c_{capeax}$ ) basados en la cantidad de vehículos, los costos de inversión unitarios, la anualidad y el factor de la tasa de descuento. Se debe tener en cuenta que como no se realizan compras de todos los vehículos cada año se realiza la diferencia entre la cantidad de vehículos actuales menos la cantidad de vehículos en el año anterior, con esto se considerarán efectivamente los vehículos nuevos adquiridos y por ende los que serán considerados efectivamente para el costo de inversión. También, aparte de multiplicar por la anualidad (con el objetivo de poder pagar durante varios años una cantidad fija las inversiones que se realicen) se multiplica por el factor de la tasa de descuento aplicada. Cabe destacar que no se consideró el costo de inversión en el 1er año de estudio ya que los vehículos diésel actuales ya están adquiridos y pagados.

$$c_{capeax} = \sum_{i,k} (Q_{i,t} - Q_{i,t-1}) \cdot c_{inv} \cdot Anualidad \cdot factor(t) \quad (3.48)$$

$$c_{capeax} = \sum_{i,k} (Q_{i,t} - Q_{i,t-1}) \cdot c_{inv} \cdot \frac{tasa}{1 - (1 + tasa)^{-n}} \cdot (1 + tasa)^{-(t-año \text{ de inicio})} \quad (3.49)$$

#### 14. Costos de estación de carga:

Esta ecuación calcula los costos de las estaciones de carga que se necesiten cuando crezca la flota de vehículos o bien se cambie de tecnología. Esta depende de la cantidad de estaciones de carga en el año, la capacidad de vehículos que soporta la estación, el costo de la estación, la anualidad y el factor de la tasa de descuento. Cabe notar que se asume costo cero para las estaciones de carga diésel ya que existen actualmente en diferentes puntos del país.

$$c_{carga} = \sum_{i,k} (N_{i,t} - N_{i,t-1}) \cdot veh_{estacion} \cdot costo_{estacion} \cdot Anualidad \cdot factor(tt) \quad (3.50)$$

### 3.6. Escenarios

Finalmente, luego de tener la base de datos completa y la programación del modelo de optimización, se definieron cuatro escenarios, en donde se variaron ciertos datos de entrada como la cantidad del límite de emisiones y  $p_{max}$ . Cabe señalar que en todos los escenarios se empleó un crecimiento de la demanda  $n$  (Cantidad de ciclos anuales de la flota) de un 1% para los camiones CAEX y un 0.5% para el caso de buses interurbanos y minibuses urbanos desde 2023 hasta 2050. También se definió para todos los escenarios la utilización de una tasa de descuento de un 10%, una vida útil de 15 años en promedio para los tres tipos de vehículos y se supuso que la capacidad de vehículos que soporta cada estación de carga son 10 vehículos en cada caso.

#### 3.6.1. Referencia

En este primer escenario de referencia se definió que no hubiera restricción para el límite de emisiones en cada medio de transporte. Junto a esto se decidió el valor de  $p_{max} = 0$  para los vehículos hidrógeno y eléctricos en todos los años del estudio. Todo esto con el fin de tener un escenario en el que no se implementara ninguna tecnología ni cambio de flota.

#### 3.6.2. Reducción 0% de emisiones

En este escenario se mantuvo la eliminación del límite de emisiones por año hasta el fin del período de estudio. Sin embargo,  $p_{max}$  se liberó, es decir, presenta un aumento gradual de  $p_{max}$  de cuatro unidades anuales desde 2029 para el caso de CAEX hidrógeno o eléctrico y desde 2026 para el caso de los buses interurbanos y minibuses urbanos.

#### 3.6.3. Reducción 50% de emisiones

Este tercer escenario consiste en mantener la gradualidad del escenario anterior que se le impuso a  $p_{max}$  pero ahora sí se implementó el límite de emisiones. Se redujo un 3,1% anual en el caso de los CAEX desde 2029, un 2,7% anual en el caso de los buses interurbanos desde 2026 y un 2,75% anual en el caso de los minibuses urbanos de la línea 702 también desde el año 2026, de modo que en el año 2050 se hubieran reducido las emisiones de  $CO_2$  en un 50% respecto al año en que comenzó dicha reducción.

### 3.6.4. Reducción 100 % de emisiones

En este último escenario similar al anterior, se mantuvo la gradualidad del impuesto a  $p_{max}$ . Y para el límite de emisiones se redujo un 45 % anual en el caso de los CAEX desde 2029, un 29 % anual en el caso de los buses interurbanos desde 2026 y un 22 % anual en el caso de los minibuses urbanos de la línea 702 desde el año 2026, de modo que en el año 2050 se hubieran reducido las emisiones de  $CO_2$  en un 100 % respecto al año en que comenzó dicha reducción.

# Capítulo 4

## Implementación

### 4.1. Casos de estudio

Para el presente trabajo se analizaron tres casos de estudio para el periodo 2023-2050, estos son:

- Camión CAEX Komatsu 930E-5 en mina rajo abierto.
- Bus interurbano modelo O500RS 1836/30 para viaje entre las regiones de Santiago y Valparaíso.
- Bus urbano modelo Marcopolo Senior G6 - Volkswagen 9.150 (WG9349) [2006], correspondiente a la línea 702 en la región de Valparaíso.



(a) CAEX Komatsu 930E-5.



(b) Bus interurbano O500RS.



(c) Bus urbano Marcopolo Senior G6.

Figura 4.1: Vehículos de referencia para el estudio.

## 4.2. Parámetros de cada tecnología

Los primeros resultados que se obtuvieron fueron los datos recopilados, estos se pueden encontrar detallados en las tablas del Anexo B.1 y B.2 donde se pudo comprobar la mayor eficiencia que existen en los componentes principales de los vehículos eléctricos y con celda de combustible de hidrógeno. En la tabla B.3 se confirmó la mayor densidad volumétrica del diésel, así como la mayor densidad gravimétrica del hidrógeno, además de poseer el mayor poder calorífico evidenciando el potencial energético que posee este combustible.

La tabla B.4 del Anexo permitió contrastar las grandes diferencias de peso entre un camión CAEX y los buses, junto con la consideración de factores como el área frontal, los coeficientes de rodadura y aerodinámico. Estos factores inciden claramente al mayor consumo de combustible del vehículo, aunque no tan significativo como la cantidad de pendiente que debe superar.

Las Figuras B.1, B.2 y B.3 muestran las proyecciones que se obtuvieron de los tres combustibles. De estas, se ve un aumento gradual, del precio del diésel en la mayoría de los años del horizonte de evaluación, mientras que el hidrógeno muestra una tendencia a reducir su costo, permitiendo que pueda ser competitivo con los demás combustibles. Por otra parte, la electricidad presenta un aumento constante y gradual pero en menor medida. Estas proyecciones son esenciales para completar la base de datos del modelo y la optimización de este.

## 4.3. Ciclos de conducción

Luego, tal como se explicó en la metodología, se obtuvieron los resultados del tiempo de ciclo, la distancia de ciclo y la cantidad de vehículos iniciales de cada flota. Estos resultados se observan en la tabla 4.1 donde destaca el corto tiempo de ciclo del camión CAEX, debido al supuesto explicado anteriormente en donde a este vehículo solo se considera el viaje de pendiente en subida y bajada y no el trayecto luego hasta el depósito o recarga.

Tabla 4.1: Resultados tiempo y distancia de ciclo para cada caso de estudio.

Transporte	Cantidad	$t_{ciclo}$ [h]	$d_{ciclo}$ [km]
CAEX	22	0.53	6.12
Bus Interurbano	23	5.00	220.94
Minibus urbano	26	3.42	22.57

Después, con los datos anteriores se pudo obtener los resultados de los ciclos ya sea por día o por año de un solo vehículo o de toda la flota, tal como se observa en la Figura 4.2. De esto se aprecia que la cantidad de ciclos al día del CAEX es muchísimo mayor que a la de los buses, esto se debe principalmente al corto tiempo - distancia de ciclo y también a la intensa jornada laboral que existe en la minería para mantener sus altos niveles de producción. Por otro lado, se ve que ambos tipos de buses presentan ciclos iguales o muy parecidos, sin embargo, las diferencias en la dimensionalidad de cada bus y por sobre todo de la distancia de ciclo de cada afectarán a los consumos y emisiones de cada uno.

Cabe notar que la cantidad de vehículos y de ciclos obtenidos son calculados para el primer año de análisis (2023), de modo de que el modelo tenga una base de referencia para luego aumentar o no la cantidad de vehículos de una cierta tecnología según corresponda.

Tabla 4.2: Resultados ciclos de conducción para los tres casos de estudio.

Transporte	Ciclos/día-veh	Ciclos/año-veh	Ciclos/año-flota
CAEX	35	12,425	273,350
Bus Interurbano	3	1,095	25,185
Minibus urbano	3	1,095	28,470

### 4.3.1. Perfil de elevación

A continuación, se obtuvieron los perfiles de elevación de los buses interurbano y urbano, a modo de obtener las pendientes, distancias en cada tramos y velocidades promedio, a continuación se muestran los perfiles y en las tablas B.5, B.6 y B.7 del Anexo se observan las cantidades en detalle que se incorporaron a la base de datos y posteriormente al modelo.

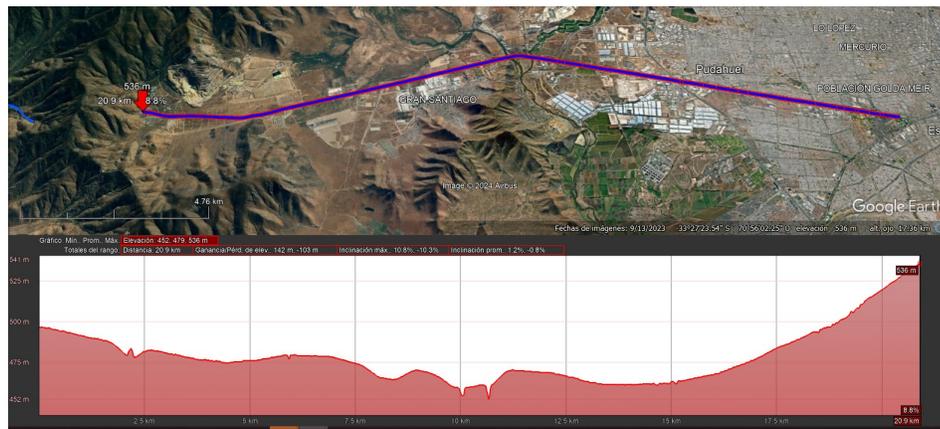


Figura 4.2: Perfil de elevación del bus interurbano para el 1er tramo: Terminal de buses Pajaritos - Túnel Lo Prado.

La pendiente máxima ocurre al final de este primer tramo casi llegando a la entrada del Túnel Lo Prado con un valor de 8.8%. Si bien el programa indica que la pendiente máxima es de 10.8% este lo detecta por la mitad del trayecto pasado los 10 km, debido a que en ese lugar se encuentra el estero Colina por ende el programa no sigue la pendiente que lleva la carretera y cruza el estero, sino que baja abruptamente hasta el nivel del agua.

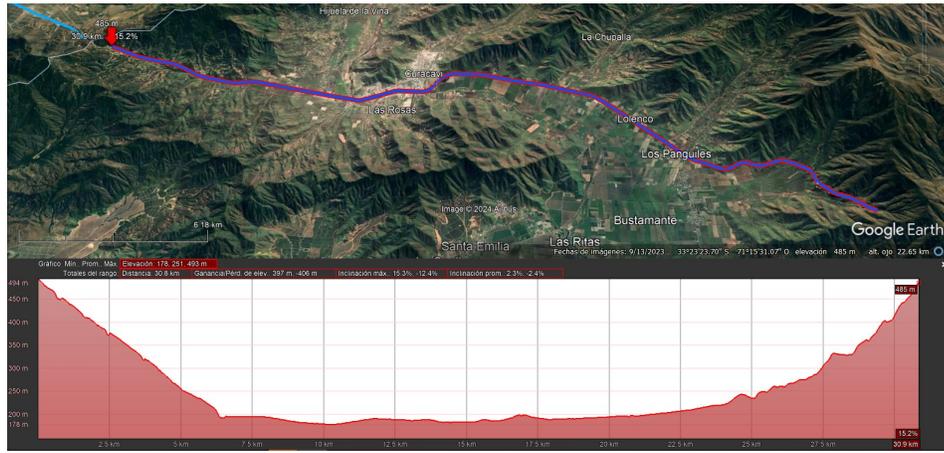


Figura 4.3: Perfil de elevación del bus interurbano para el 3er tramo: Túnel Lo Prado - Túnel Zapata.

En este tercer tramo la pendiente máxima ocurre nuevamente hacia el final del tramo casi llegando a la entrada del Túnel Zapata. El valor máximo que alcanza es de 15.2%.

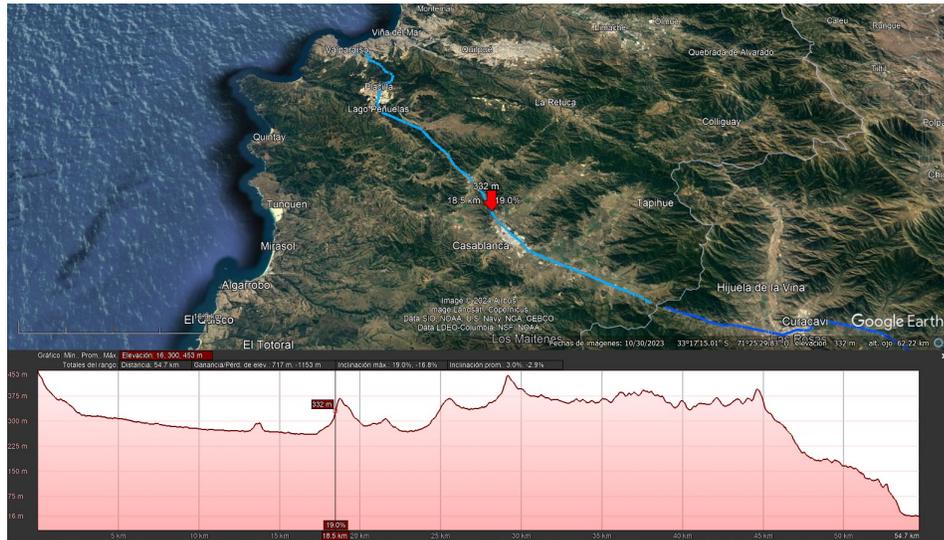


Figura 4.4: Perfil de elevación del bus interurbano para el 5to tramo: Túnel Zapata - Terminal Rodoviario Valparaíso.

Finalmente, en este 5to tramo de ida la pendiente máxima alcanza el valor de 19% el cual ocurre a los 18,5 km desde la salida del Túnel Zapata.

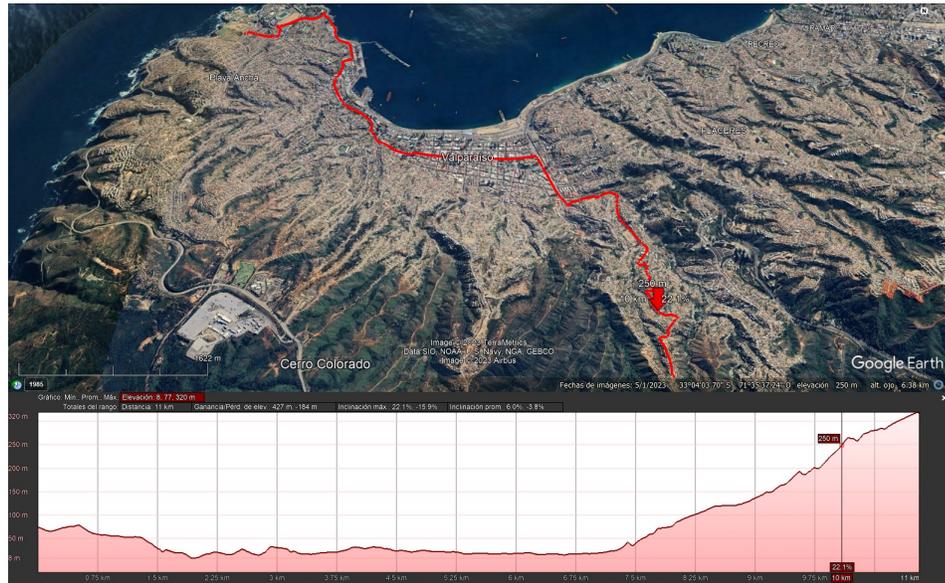


Figura 4.5: Perfil de elevación del minibus urbano correspondiente a la ruta L702 de ida: Garita Galvarino - Camino Las Torres.

En este caso, la pendiente máxima ocurre casi al final del recorrido de ida de la línea 702. Alcanza un valor de 22,1% a 10 km desde la salida en la Garita Galvarino ubicada cercana a la zona costera de Valparaíso.

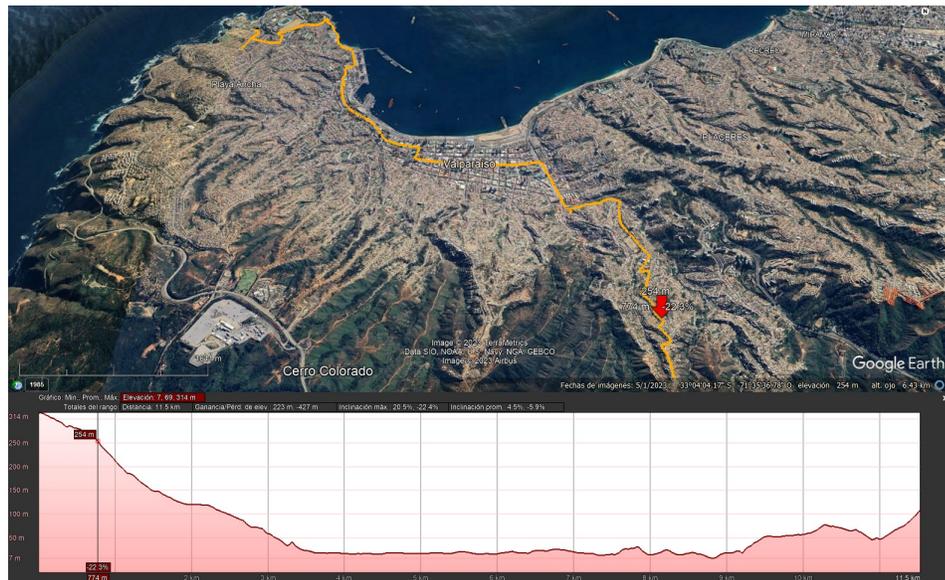


Figura 4.6: Perfil de elevación del minibus urbano correspondiente a la ruta L702 de vuelta: Camino Las Torres - Fin 702.

Sin embargo, para el caso del trayecto de vuelta se nota que alcanza una pendiente negativa máxima importante para el caso del sistema de regeneración de energía. acá se obtiene un valor de -22,3% a 774 m desde la salida en la parada Camino Las Torres.

# Capítulo 5

## Resultados y discusiones

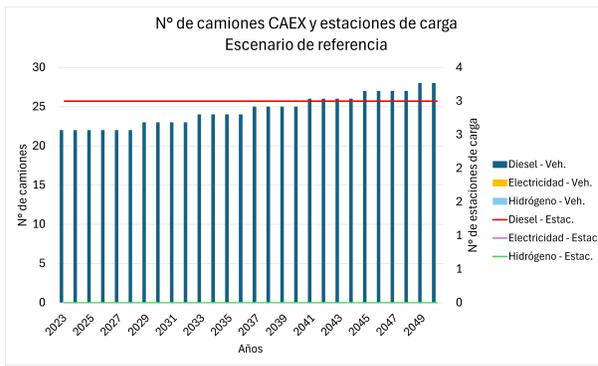
### 5.1. Escenarios

A continuación se presentan los resultados por escenarios, incluyendo el análisis de las salidas en términos económicos, energéticos y de emisiones de GEI.

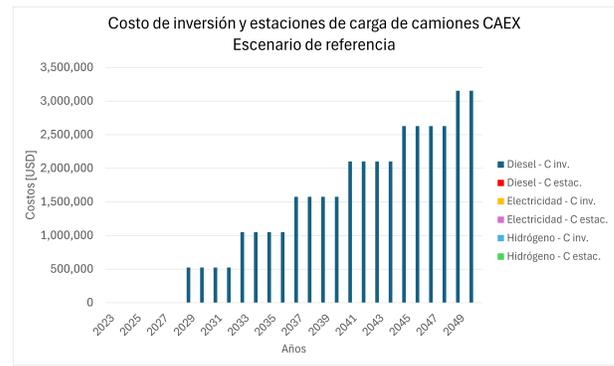
#### 5.1.1. Referencia

De la Figura 5.1 (a) se observa que la cantidad de camiones CAEX diésel aumentan en una unidad cada cuatro años desde 2028 hasta el fin del período, mientras que el número de estaciones de carga se mantiene en tres desde el inicio del período hasta el final. Se observa que las demás tecnologías no participan en ningún año, esto es concordante de acuerdo a las suposiciones de este escenario de referencia ya que no admite incorporación de nueva flota debido a  $p_{max} = 0$  y además no hay restricción de emisiones para estos vehículos diésel. Este escenario representa no hacer cambio alguno al escenario actual. Cabe destacar que el aumento gradual de la cantidad de vehículos observado se debe totalmente a la supuesto de que la demanda (cantidad de ciclos totales anuales) aumenta en un 1% anual.

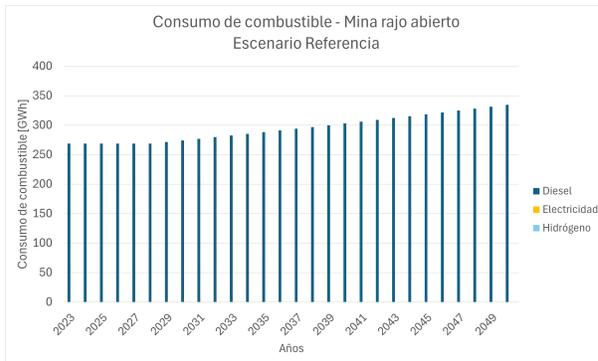
Junto a esto, el gráfico (b) de la Figura 5.1 es concordante con lo anterior ya que como la cantidad de estaciones de carga se mantiene en tres y no se necesita de otra, no se invierte en ella, pero sí se necesitan nuevos vehículos al pasar los años. Por ello, este gráfico (b) representa los años en que se incorporaron nuevos vehículos a la flota y por ende se tuvo que invertir en dichos años, cabe destacar que como se siguen pagando las anualidades en los años siguientes de la inversión realizada, el costo de inversión aumenta ya que se acumula la anualidad a pagar cuando se incorporan nuevos vehículos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1: Gráficos obtenidos en el escenario de referencia para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. (a) N° de camiones y estaciones de carga. (b) Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. (c) Consumo de combustible [GWh]. (d) Costo de operación [USD].

Por otro lado, de la Figura 5.1 (c) se ve que el aumento de consumo de combustible comienza gradualmente en 2029 cuando se comienzan a incorporar camiones. Esto repercute directamente en los costos operacionales en la misma Figura pero del gráfico (d) aumentando continuamente. Sin embargo, al inicio del período entre 2023 y 2025 ocurre un aumento más pronunciado, aunque en dicho período no existe aumento en la cantidad de vehículos, si hay una elevación del costo del combustible diésel (véase B.11) que afecta proporcionalmente al OPEX.

La situación para los resultados de los casos de buses interurbanos (ver Figura 5.2) y urbanos (ver Figura 5.3) para este escenario de referencia es análoga al caso de los camiones CAEX descrito anteriormente. Existen dos diferencias principales: la primera, es que en ambos casos se observa un crecimiento aún más gradual de las flotas, esto debido al 0,5% de aumento en la cantidad de ciclos totales por año que deben recorrer y en segundo lugar, se debe a que las cantidades mínimas y máximas de los costos y consumos de combustible son diferentes entre sí, producto de la magnitud (masa) de cada vehículo y la distancia recorrida en sus trayectos.

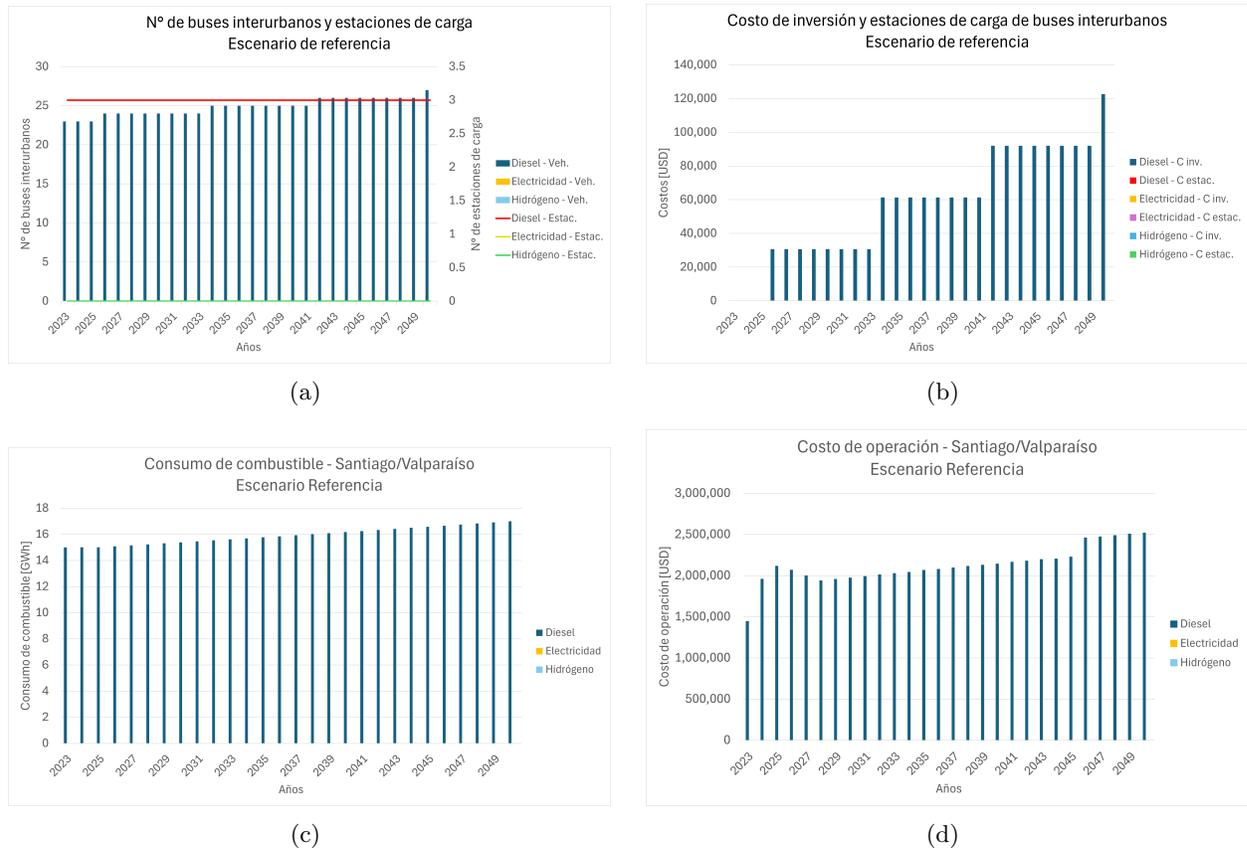


Figura 5.2: Gráficos obtenidos en el escenario de referencia para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

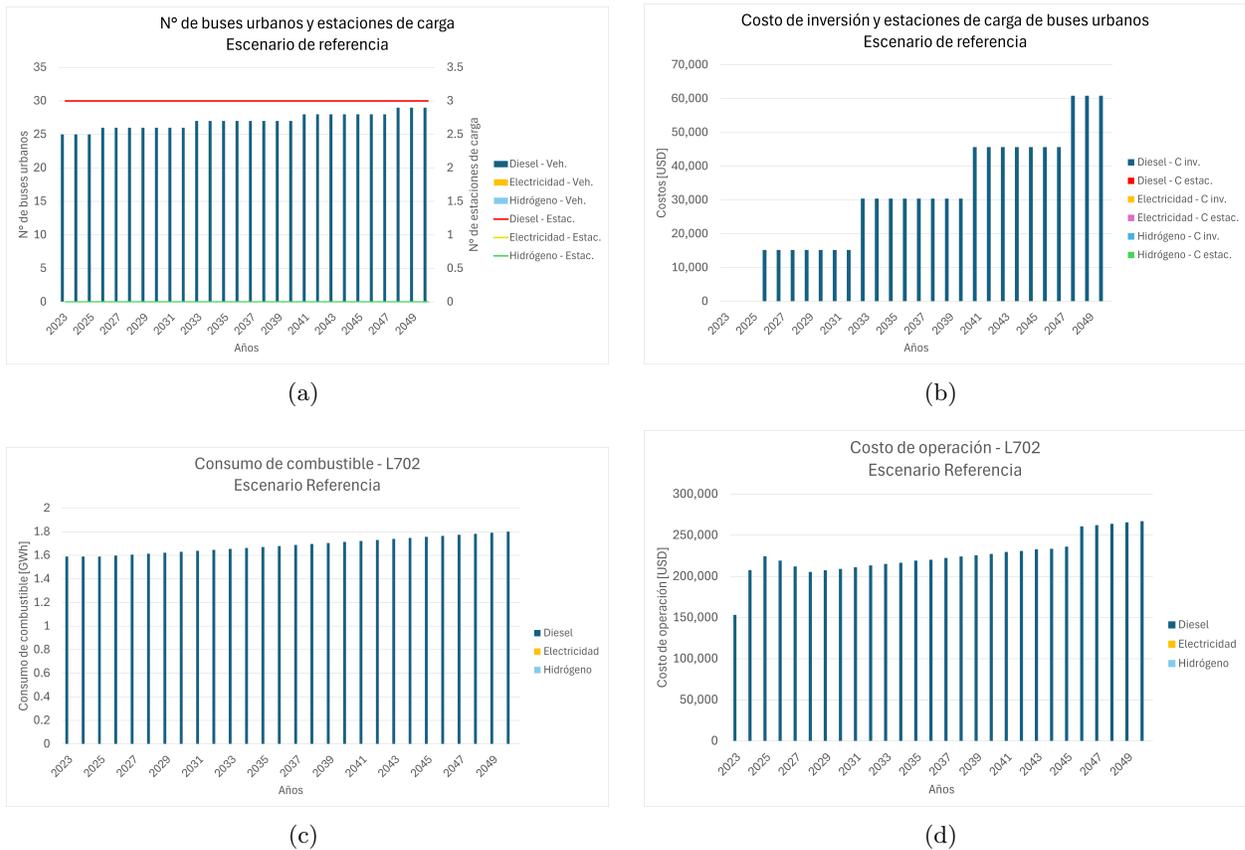


Figura 5.3: Gráficos obtenidos en el escenario de referencia para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

### 5.1.2. Reducción 0% de emisiones

En este segundo escenario se obtuvieron los siguientes resultados. Observando los datos obtenidos de la Figura 5.4, se ve que la cantidad de CAEX diésel se mantuvo constante en todo el período (al igual que el n° de estaciones de carga para este combustible), esto se explica ya que si bien tampoco hay restricciones para el límite de emisiones que puedan generar los vehículos, sí se permite la utilización de otra tecnología ya que  $p_{max}$  (restricción de potencia) es distinta de cero y esta comienza a aumentar como se explicó en la metodología, es decir, la cantidad se mantiene constante ya que la nueva demanda se cubre con camiones a hidrógeno y además estos ingresan para suplir la participación de camiones a diésel. Por otro lado, comienza a incorporarse y aumentar la flota de camiones hidrógeno desde 2029 llegando a 28 unidades provocando a su vez que el n° de estaciones crecieran hasta 3 en 2034.

La decisión que toma el modelo de incorporar y hacer el recambio de vehículos cero emisiones se explica debido a que el modelo genera ahorros, es decir, que si bien la inversión va aumentando en los primeros años que se comienzan a integrar los vehículos, esta se estabiliza producto del pago de anualidades (ver Figura 5.4(b)) y a su vez el costo operativo de los camiones hidrógeno sale más rentable en el largo plazo (Figura 5.4(d)) a diferencia de los diésel (pasa de un costo superior a 35M [USD/flota] a costos entre 7M [USD/flota]). Esto se debe a que consumen menos combustible a diferencia de los diésel (Figura 5.4(c)) y la disminución del costo del hidrógeno proyectado también

ayuda a este recambio tecnológico. Cabe notar que el costo de las estaciones de carga es bastante menor al costo de inversión de los camiones, por lo que su efecto no es relevante en la toma de decisión del modelo.

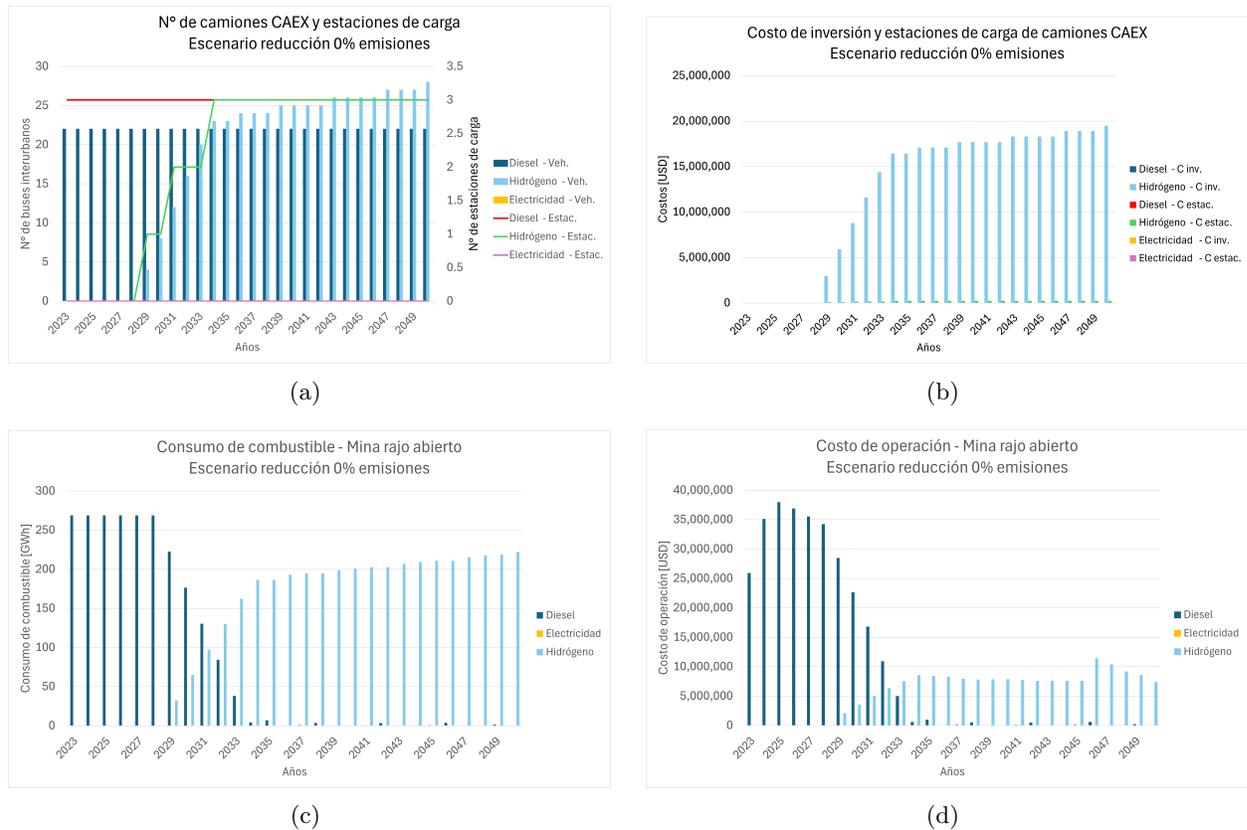
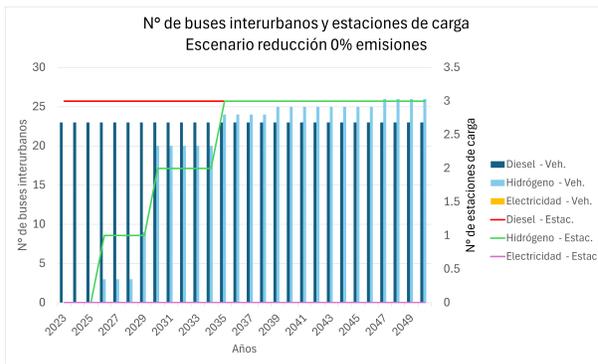


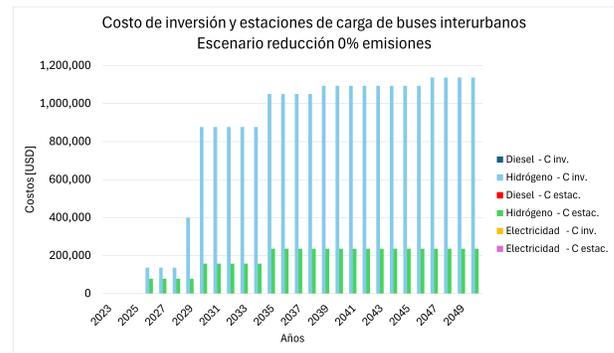
Figura 5.4: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 0% las emisiones hasta el año 2050 para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

En el caso de los buses interurbanos, en este segundo escenario como se observa de la Figura 5.5(a) el modelo toma la misma decisión de comenzar a invertir en buses a hidrógeno para realizar el recambio de buses diésel, la razón para hacer esto es la misma expuesta en el caso anterior de los camiones CAEX para este escenario con 0% de reducción de emisiones. En este caso la compra de flota comienza a ocurrir desde 2026 lo cual es bastante probable que ocurra en el corto plazo, debido a que recientemente en el país se comenzaron a desarrollar un par de proyectos piloto de buses similares.

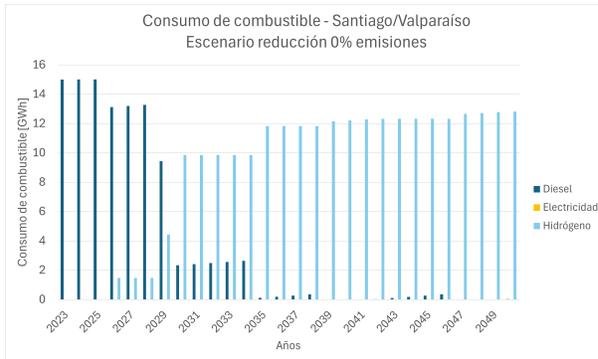
Otro aspecto importante es la gran inversión inicial que ocurre desde 2029 (5.5(b)) pero producto del pago de anualidades también se estabiliza el pago de las inversiones en los años siguientes. De la misma Figura (b) se observa que los costos de la estación de carga son mayores (que los de los CAEX) aún así su valor anual es bastante menor al costo de inversión cuando se integran vehículos a la flota. Probablemente por ello es que el modelo decide hacer una gran inversión luego del primer período de recambio, ya que a largo plazo resulta ser más conveniente tener buses a hidrógeno que diésel como se observa en la Figura 5.5(d). Cabe notar en este caso que la diferencia en el consumo de combustible al pasar a hidrógeno no es tan considerable como el caso anterior de los camiones CAEX.



(a)



(b)



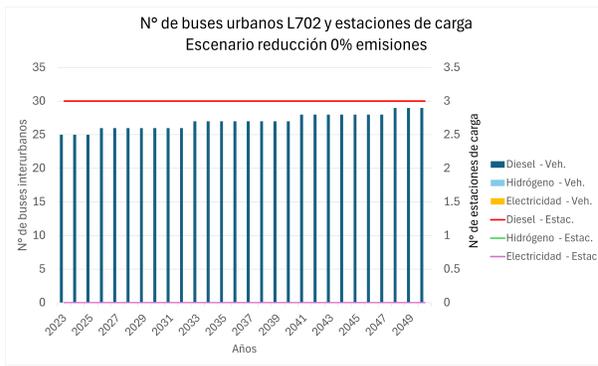
(c)



(d)

Figura 5.5: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 0% las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

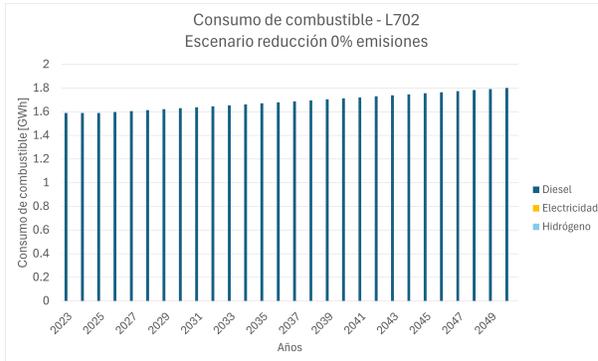
Ahora bien, al observar la Figura 5.6 se observa que no hay cambios con respecto al escenario de referencia para los buses urbanos, es decir, no es conveniente aún en este caso realizar el recambio de vehículos. Cabe mencionar que los saltos que ocurren en el gráfico de los costos de operación se debe fundamentalmente a que la curva de demanda no quedó tan lineal como se proyectó, sumado también a la influencia directa de los costos unitarios del combustible y las proyecciones utilizadas.



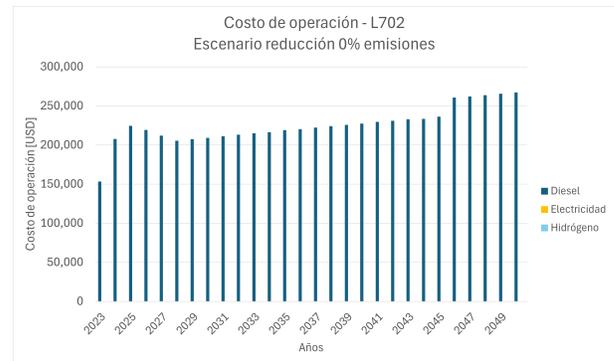
(a)



(b)



(c)



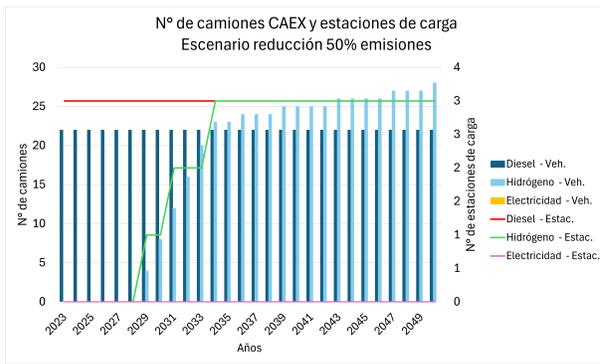
(d)

Figura 5.6: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 0% las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

### 5.1.3. Reducción 50% de emisiones

En este tercer escenario al observar los resultados de la Figura 5.7 (a), se nota que la cantidad de CAEX diésel se mantuvo en todo el período por lo que el n° de estaciones no se vio afectado, mientras que el n° de CAEX a hidrógeno comenzaron a incorporarse gradualmente desde 2029 llegando a 28 unidades provocando a su vez que el n° de estaciones crecieran hasta 3 unidades desde 2034. Esta incorporación de vehículos con celda de combustible de hidrógeno se explica principalmente al aumento gradual de  $p_{max}$  (restricción de potencia) ya que no es cero en todo el horizonte de evaluación. Se nota, además, que no hay cambios respecto al escenario anterior con reducción de 0% de emisiones, por lo que la restricción de emisiones en este caso probablemente no esté afectando a la decisión del modelo debido a que este decide comenzar a realizar el recambio producto de los ahorros que generan los costos operativos comparados con los costos de inversión, que si bien aumentan, este incremento no es suficiente para el ahorro del OPEX.

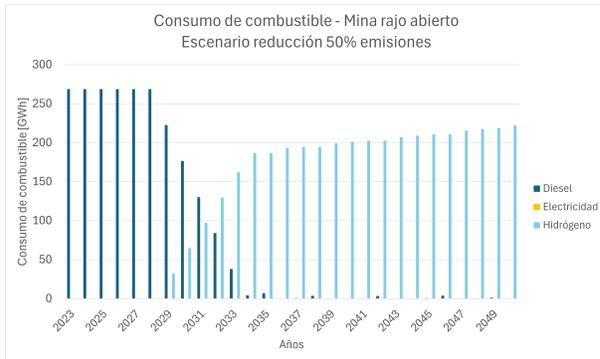
Para el resto de gráficos (b), (c) y (d) de la Figura 5.7 el análisis es el mismo que en el segundo escenario de reducción en 0% de emisiones. Además, como se observa de la Figura 5.8 los resultados obtenidos para los buses interurbanos son los mismos que para el escenario anterior con 0% en la reducción de emisiones.



(a)



(b)

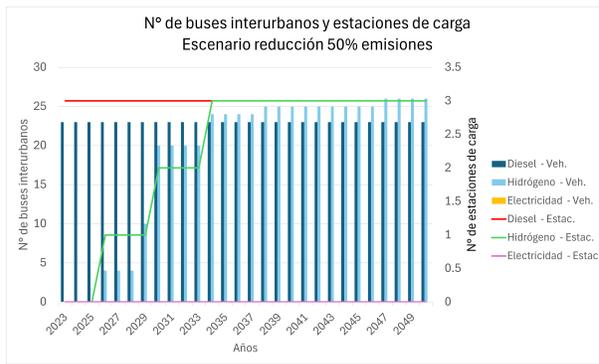


(c)



(d)

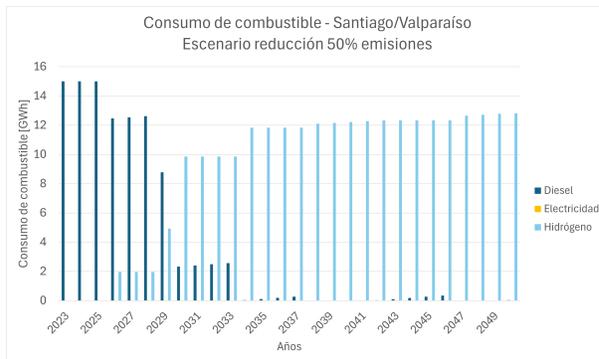
Figura 5.7: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 50 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. (a) N° de camiones y estaciones de carga. (b) Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. (c) Consumo de combustible [GWh]. (d) Costo de operación [USD].



(a)



(b)



(c)

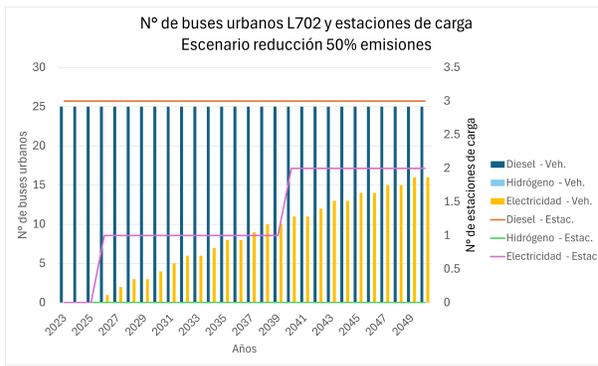


(d)

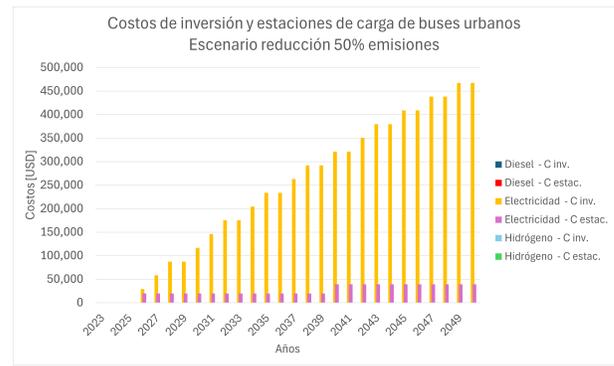
Figura 5.8: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 50 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. (a) N° de camiones y estaciones de carga. (b) Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. (c) Consumo de combustible [GWh]. (d) Costo de operación [USD].

Sin embargo, los resultados obtenidos en la Figura 5.9 correspondiente al caso de los buses urbanos de la línea 702 cambian respecto a los escenarios anteriores. En este caso el modelo decide realizar el recambio por vehículos eléctricos los cuales comienzan a incorporarse desde 2026 en adelante. Ahora bien, al mirar el gráfico (b) de la Figura 5.9 se nota un aumento gradual del costo de inversión de la flota, esto se explica debido a que el modelo decide ir comprando un vehículo a la vez, por lo que las anualidades se van acumulando, en casi todos los años restantes, lo cual claramente no es realista. El modelo lo hace debido a que en primer lugar incorporar buses urbanos a hidrógeno resultaría más caro en este caso y en segundo lugar se debe a que el modelo debe seguir sí o sí la limitante de disminuir gradualmente las emisiones de  $CO_2$  en un 2.75 % hasta reducirlas un 50 % en 2050. Por otro lado, el recambio de vehículos eléctricos en buses urbanos es lo esperado y lo que a través de los años el ministerio de energía a impulsado y participado de iniciativas que promueven la electromovilidad [41]. El caso más claro es el recambio gradual que se ha hecho en los buses RED de la región Metropolitana.

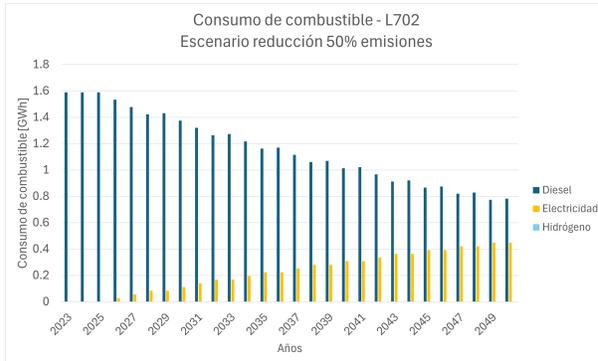
Otro aspecto relevante al observar los gráficos (c) y (d) de la Figura 5.9 es que, al comparar el consumo energético de combustible de toda la flota en 2050, los eléctricos consumen aproximadamente la mitad de energía que los diésel, aunque al final del período su costo operativo es similar. Esto ocurre producto de la proyección de costos del diésel y de la electricidad, en donde los primeros crecen al principio y luego decrecen gradualmente, mientras que las proyecciones del precio de la electricidad aumentan de forma muy gradual (ver tabla B.11).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.9: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 50 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

#### 5.1.4. Reducción 100 % de emisiones

En este último escenario se comienza observando del gráfico (a) de la Figura 5.10 que el recambio de camiones CAEX comienza en 2029, incorporando paulatinamente los camiones con celda de combustible de hidrógeno (al igual que en el escenario previo con 50 % reducción de emisiones), la diferencia es que en este caso el crecimiento de la flota es hasta 2033 aproximadamente y luego vuelve a crecer de forma significativa en 2040. Este estancamiento temporal en el crecimiento de la flota de camiones hidrógeno se debe a que el modelo decide incorporar una flota de menor medida de seis unidades de camiones CAEX eléctricos entre 2029-2030.

Esta combinación de flotas se debe a diferentes factores, en primer lugar, se incorporan camiones eléctricos ya que su costo de inversión en 2029 es menor que el costo de inversión de los camiones hidrógeno, luego al año siguiente se aumenta la cantidad de CAEX eléctricos pero el costo de inversión crece casi igualando al costo de inversión de la integración de los camiones de hidrógeno (ver Figura 5.10(b)).

Si bien como se observa de la Figura 5.10(c) y (d) el camión eléctrico resulta ser más competitivo en cuanto a consumo energético y muy similar en cuanto a costos operativos con respecto a los camiones de hidrógeno, resulta que el modelo decide decantarse por el recambio a estos últimos debido a que

un factor que también tiene en cuenta el modelo es la eficiencia del vehículo, en donde el hidrógeno se impone por sobre el diésel y las baterías eléctricas [42] [43] [44].

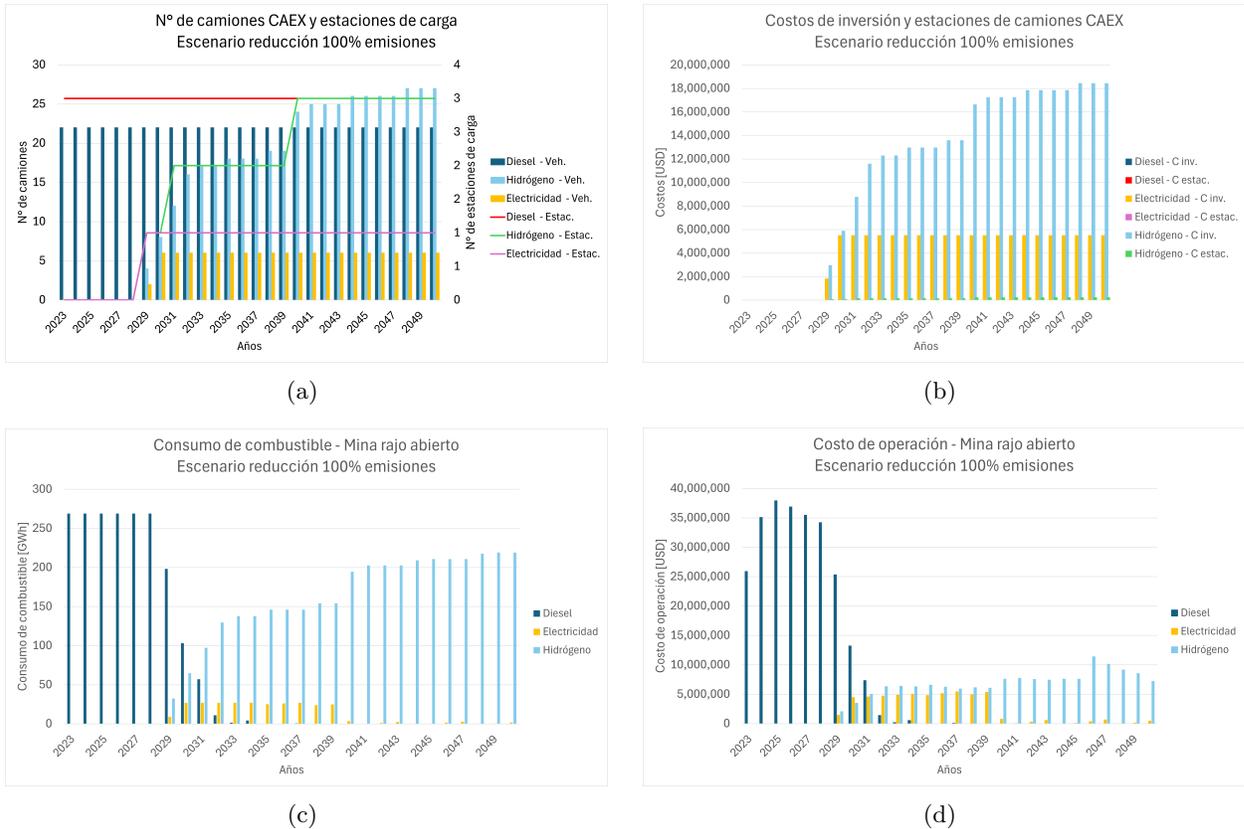
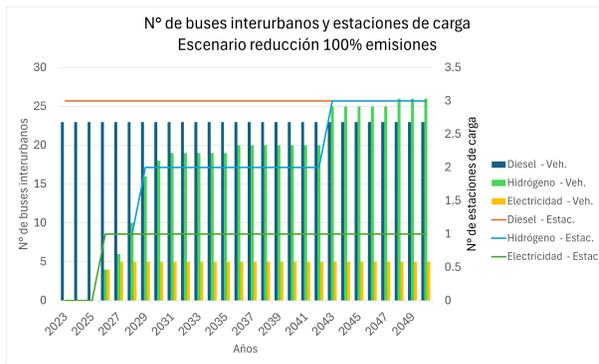


Figura 5.10: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 100% las emisiones hasta el año 2050 para la flota de camiones CAEX en mina a rajo abierto. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

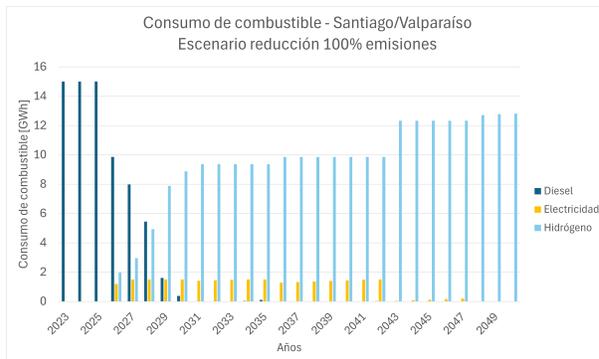
Para el caso de los buses interurbanos en este cuarto escenario, como se observa de la Figura 5.11 es análogo al caso anterior de los camiones CAEX. Sólo cambian las cantidades en los gráficos, al ser un vehículo de menores dimensiones y con menores costos que un camión CAEX.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.11: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 100 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses interurbanos en el trayecto Santiago - Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

Finalmente, para este cuarto caso se tienen los resultados obtenidos para el caso de los buses urbanos de la línea 702, en donde como se aprecia de la Figura 5.12 (a) el recambio de flota se enfatiza en los buses urbanos eléctricos, los cuales comienzan a incorporarse desde 2026 hasta 2032 en donde siguen operando hasta el final la cantidad de 20 buses. Cabe recordar que en el escenario anterior de 50 % de reducción de emisiones el recambio de buses urbanos también se realizó hacia los eléctricos, por lo que concuerda con este escenario donde se restringe aún más el límite de emisiones de la flota.

Cabe destacar que este gran aumento de flota lleva consigo un costo inicial considerable, pero gracias al pago de anualidad, se logra estancar el gasto durante los años siguientes para la tecnología eléctrica en comparación al costo de sus estaciones de carga que es menor.

Por otro lado, se observa que existe una inversión de buses de hidrógeno al inicio, pero sus costos de inversión y más aún el costo de la estación de carga es incluso superior al de inversión por lo que el modelo sigue optando por los buses eléctricos hasta 2033 donde nuevamente invierte en buses hidrógeno hasta llegar a 9 unidades en 2050.

En cuanto al consumo de combustible, como se aprecia en la Figura 5.12(c) los buses eléctricos son levemente superior al de hidrógeno al final del período de estudio, cabe resaltar que el consumo energético de los buses urbanos a hidrógeno al final del período es solo un 0.2 [GWh] menor al de los

eléctricos, considerando que ni siquiera son la mitad de unidades que la flota eléctrica. Esto demuestra el mayor consumo por unidad que necesita el minibus urbano en este trayecto y por ende hace que sea más difícil el recambio a esa tecnología.

Además, al ver el gráfico (d) de la Figura 5.12 se destaca que los buses eléctricos tengan costos operativos mucho mayores que los de hidrógeno. Esto provoca que el modelo comience a invertir en más buses de hidrógeno con el tiempo, y esto se debe a varios factores, a las diferencias de precio de ambos combustibles, en donde el costo del hidrógeno cae significativamente con respecto a los primeros años (proyección optimista) mientras que la electricidad aumenta de forma constantemente lenta (proyección normal-pesimista). Otro factor posiblemente sea el mejor rendimiento que calcula internamente el modelo para los vehículos de hidrógeno en comparación con los eléctricos.

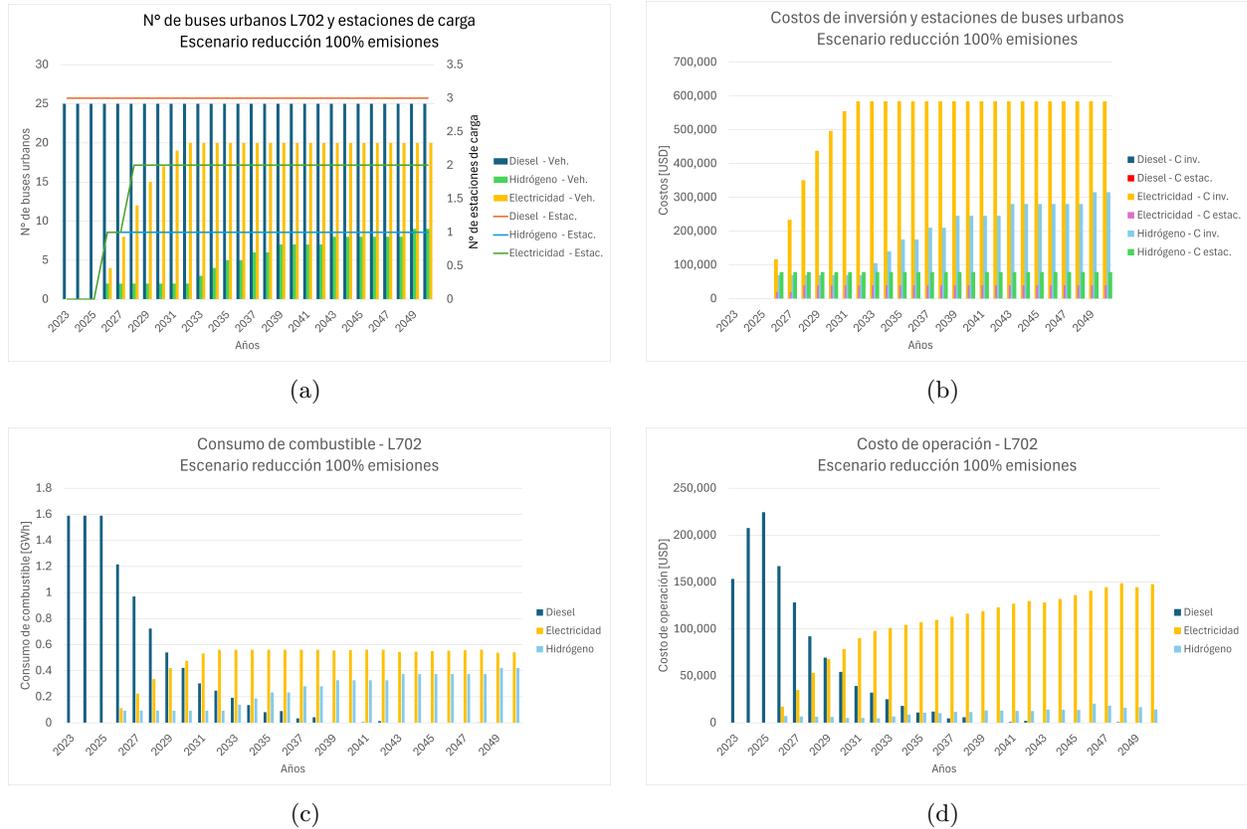


Figura 5.12: Gráficos obtenidos en el escenario de reducción en un 100 % las emisiones hasta el año 2050 para la flota de buses urbanos en el recorrido de la línea 702 en la región de Valparaíso. **(a)** N° de camiones y estaciones de carga. **(b)** Costo de inversión [USD] y costo de las estaciones de carga [USD]. **(c)** Consumo de combustible [GWh]. **(d)** Costo de operación [USD].

## 5.2. Emisiones de $CO_2$

Finalmente, al observar los resultados obtenidos de las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se corrobora que al imponer un límite de emisiones anuales que fuesen reduciendo su cantidad en los distintos escenarios, el modelo logra disminuir las emisiones de  $CO_2$  en todos los escenarios excepto en el de referencia, ya que en este último se impuso explícitamente que no se pudiera incorporar otra tecnología para suplir las demandas en cada caso.

Ahora bien, analizando en más detalle los tres gráficos mencionados, se observa que en el caso de la Figura 5.13 las emisiones de la flota de camiones CAEX en la mina a rajo abierto parte desde las 80.000 [tonCO<sub>2</sub>] en donde para el caso de referencia estas aumentan paulatinamente hasta casi las 10.000 [tonCO<sub>2</sub>] en 2050. Mientras que en los tres siguientes escenarios se reducen rápidamente las emisiones desde 2028 en adelante llegando a valores muy cercanos a 0 luego de 2035. Esto se debe fundamentalmente al recambio de flota de vehículos cero emisiones como se detalló anteriormente en cada escenario correspondiente. Cabe notar que en el escenario de reducción en un 100 % las emisiones a 2050, la disminución de estas ocurre incluso antes que sus dos escenarios predecesores.

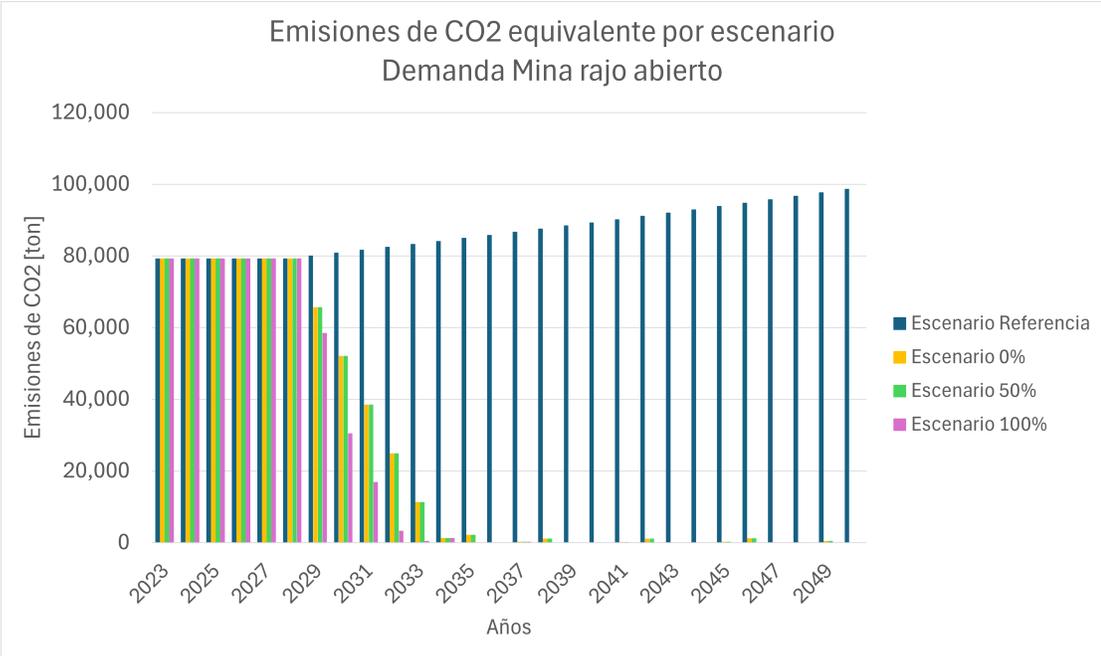


Figura 5.13: Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para demanda de mina rajo en los 4 escenarios supuestos [Elaboración propia].

Con respecto a la Figura 5.14 las toneladas de la flota inicial a reducir comienzan cerca de las 4.500 [tonCO<sub>2</sub>] llegando a las 5.000 [tonCO<sub>2</sub>] para el escenario de referencia. Mientras que, la reducción de emisiones baja significativamente a valores menores a 1.000 [tonCO<sub>2</sub>] en el año 2029 para los escenarios 2 y 3, llegando a valores cercanos a 0 desde 2034. Por su parte el último escenario, al igual que en el caso de anterior de los camiones mineros, se reducen las emisiones prácticamente en 2030 para los buses interurbanos.

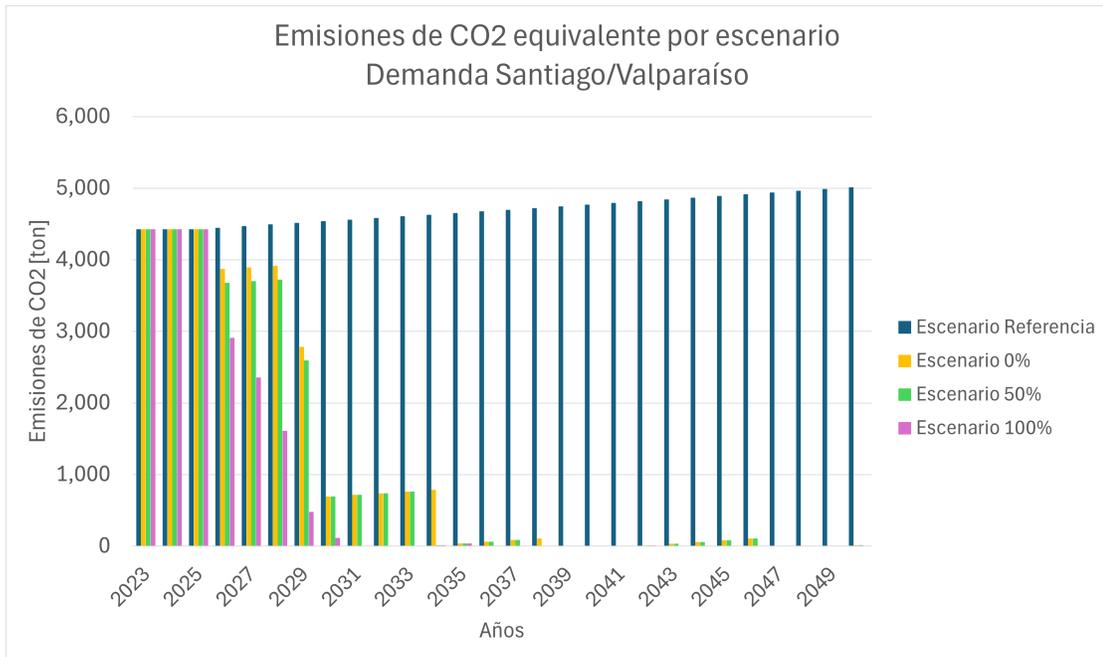


Figura 5.14: Emisiones de  $CO_2$  equivalente para demanda de ruta Santiago - Valparaíso en los 4 escenarios supuestos [Elaboración propia].

Por último, donde se ve mayor diferencia con respecto a los casos anteriores es en la Figura 5.15 correspondiente a los buses urbanos de la línea 702. En este caso, los 2 primeros escenarios (referencia y 0%) parten con 480 [tonCO<sub>2</sub>] aproximadamente aumentando incluso estas al final del período de estudio a 520 [tonCO<sub>2</sub>]. Por otro lado, en el tercer escenario (50% reducción de emisiones) incorporando el recambio de vehículos cero emisiones se llega a 220 [tonCO<sub>2</sub>] al año 2050. Mientras que en el último escenario, la disminución de las emisiones comienza en 2026 y cae abruptamente de forma exponencial a cero en el año 2039.

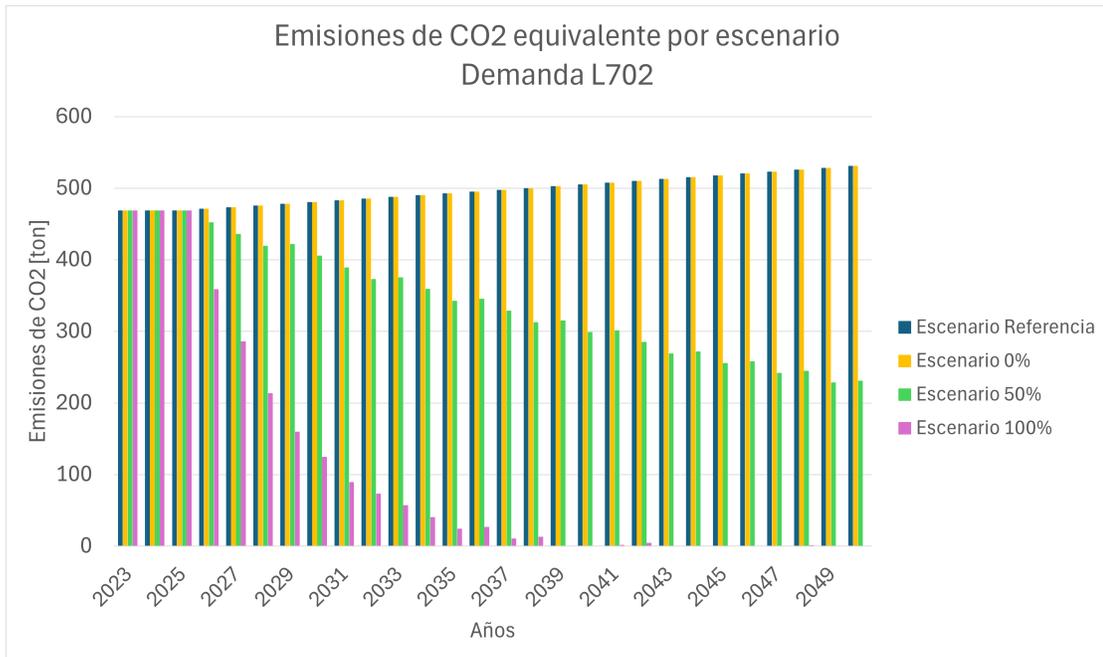


Figura 5.15: Emisiones de  $CO_2$  equivalente para demanda de L702 en los 4 escenarios supuestos [Elaboración propia].

Con estos últimos resultados, se nota que tanto para el caso de los camiones CAEX en mina a rajo abierto como para los buses interurbanos de Santiago - Valparaíso logran disminuir la totalidad de las emisiones de  $CO_2$  incluso en los escenarios en donde no se limita completamente las emisiones, como resultó ser en los escenarios 2 y 3. Con lo cual se infiere que con los supuestos realizados y por ende estos resultados obtenidos, el recambio por vehículos cero emisiones es totalmente posible y rentable. Ya que por una parte se ahorra en costos operativos al cambiar de tecnología, es decir, al cambiar de diésel a hidrógeno o de diésel a electricidad. Mientras que por otro lado se logran reducir en su totalidad las emisiones antes del término del período de estudio.

# Capítulo 6

## Conclusiones

La carbono neutralidad representa un paso significativo hacia un futuro sustentable, lo cual conlleva transicionar hacia una flota de vehículos más sostenible en Chile. La necesidad de abordar la carbono neutralidad para el año 2050 ha llevado a idear e identificar estrategias de mínimo costo para poder recambiar las flotas de vehículos por tecnologías cero emisiones, y es exactamente lo que en este trabajo se buscó. En donde el hecho de analizar tres casos de estudio específicos tan diferentes entre sí durante el periodo 2023-2050 permite entregar una visión detallada y aplicada del recambio en diferentes contextos.

Ahora bien, durante el desarrollo de este trabajo de título se ha podido cumplir con los objetivos propuestos en donde la elaboración y desarrollo del modelo de optimización fue crucial para la correcta obtención de resultados y entregar las mejores estrategias para abordar en cada caso.

El modelo de optimización desarrollado ha demostrado generar ahorros significantes en cuanto a los costos operativos totales, es decir, gasta menos en costos operativos totales que en la inversión realizada al recambiar la flota tanto en camiones como buses interurbanos. Esto es una buena noticia, ya que inicialmente se podría haber esperado una preferencia hacia el uso de combustibles fósiles o bien que la transición costase aún más años que el período de estudio. Por ejemplo, Los resultados indican que para el año 2050 se prevé un ahorro de 43M USD en el costo operativo (OPEX) de los camiones CAEX, a pesar de un aumento de 21M USD en el costo de inversión (CAPEX), lo que resulta en un ahorro neto de 22M USD. Para los buses interurbanos, se estima un ahorro de 2.1M USD en OPEX, aunque el CAPEX aumenta en 1.47M USD, generando un ahorro neto de 0.63M USD. Esto se debe al alto consumo energético del diésel, a las altas proyecciones de costos para el diésel y proyecciones de costos menores para la electricidad y el hidrógeno, generando por lo tanto ahorros en OPEX cuando decide cambiar de tecnología.

En cuanto a los minibuses urbanos, se prevé un ahorro de 100K USD en OPEX, pero un aumento de 940K USD en CAPEX, lo que resulta en un gasto total mayor de 840K USD por la renovación de la flota. Sin embargo, en este caso, aunque se produzca un mayor gasto económico al recambiar la totalidad de la flota, el modelo decide realizarlo por la reducción de emisiones totales que se deben cumplir en el año 2050.

Además, en el caso de camiones CAEX en mina a rajo abierto y en buses interurbanos se logran

disminuir a cero las emisiones de  $CO_2$  desde los años 2036 - 2039, para tres de los cuatro escenarios propuestos, es decir, mucho antes que lo proyectado a 2050. Mientras que los buses urbanos de la línea 702 reducen sus emisiones a la mitad en el escenario 50 % reducción de emisiones, y logran disminuir a cero sus emisiones desde 2039 para el escenario 100 % reducción de emisiones, cumpliendo de igual forma con la restricción de cada escenario.

Por otro lado, incluir el hidrógeno verde como vector energético en el modelo ha destacado ser lo suficientemente competitivo, aunque se plantea la posibilidad de que las proyecciones del precio del hidrógeno hayan sido demasiado generosas, probablemente por eso quizás el modelo decide incorporarlo casi en todos los escenarios. Por lo tanto, a futuro se podrían seguir realizando iteraciones del modelo, donde se pueden ajustar y variar las proyecciones del precio de los combustibles (especialmente el hidrógeno ya que es el que más incertidumbre tiene hasta el momento) para observar cómo afectan los resultados.

Como trabajo futuro, los tramos definidos se podrían subdividir en mayores cantidades, de forma que en algún punto las muestras no sean discretas sino continuas permitiendo así una representación más precisa de la realidad en el modelo. Junto a esto, se podría modelar de forma más detallada el requerimiento de la estación de carga desde la generación de la electricidad, considerando aspectos a tener en cuenta como el consumo de agua utilizada en los procesos de electrólisis. Todo esto contribuiría a una comprensión más completa de los impactos asociados.

También, en el ámbito práctico, la posibilidad de vender vehículos que ya no operan podría ser una estrategia adicional para optimizar la gestión de la flota y disminuir el costo total.

Estas ideas sugieren posibles áreas de mejora y desarrollo futuro en la investigación ya que el análisis se puede ramificar a muchos más aspectos lo que permitiría refinar y enriquecer aún más las conclusiones obtenidas. En resumen, este trabajo ofrece una contribución al entendimiento de las estrategias de recambio de flotas de vehículos hacia tecnologías cero emisiones, sirviendo como base para futuros estudios y acciones concretas en la dirección de la carbono neutralidad en el transporte chileno.

# Bibliografía

- [1] Barría, C., Searle, J. P., Santander, A., García, M. J., Guzmán, R., Mancilla, C., *et al.*, “Carbono neutralidad en el sector energía,” 2020, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe\\_resumen\\_cn\\_2019\\_v07.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe_resumen_cn_2019_v07.pdf).
- [2] T.E.S, “Vectores energéticos sustentables,” 2022, <https://www.tesenaccion.org/vectoresenergeticos>.
- [3] Unidad de Tecnologías del Hidrógeno – Pontificia Universidad Católica de Chile, “Implementación flota de buses de hidrógeno en el sistema de transporte metropolitano red,” 2022, [https://programacalac.com/wp-content/uploads/2023/07/Informe-H2\\_version-final-1805\\_compressed-1.pdf](https://programacalac.com/wp-content/uploads/2023/07/Informe-H2_version-final-1805_compressed-1.pdf).
- [4] Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., Benson, S. M., Bradley, T., Brouwer, J., Chiang, Y.-M., *et al.*, “Net-zero emissions energy systems,” *Science*, vol. 360, no. 6396, p. eaas9793, 2018, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aas9793>.
- [5] Merino, A., “Verde, azul o negro: los distintos tipos de hidrógeno,” 2022, <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/tipos-hidrogeno/>.
- [6] Ministerio del Medio Ambiente, “Estrategia climática de largo plazo de Chile,” 2021, <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>.
- [7] Ministerio del Medio Ambiente, “Contribución determinada a nivel nacional (ndc) de Chile,” 2020, [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC\\_Chile\\_2020\\_espan\%CC%\%83o1-1.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan\%CC%\%83o1-1.pdf).
- [8] Ministerio de Energía, “Estrategia nacional de electromovilidad 2021,” 2021, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad\\_ministerio-de-energia.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf).
- [9] China, D., “Fueling the future of mobility,” *Hydrogen and fuel cell solutions for transportation*, vol. 1, 2020, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>.
- [10] Donoso, M., “Evaluación de escenarios de uso de hidrógeno en Chile mediante un modelo de planificación energética,” 2022, <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/189188/Evaluacion-de-escenarios-de-uso-de-hidrogeno-en-Chile-mediante-un-modelo-de-planificacion-energetica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [11] SBH4, “Towards gw-scale hydrogen electrolysis,” 2021, <https://sbh4.de/assets/towards-gw-scale-hydrogen-electrolysis.pdf>.
- [12] Risbudand, M. *et al.*, “Chapter 14 - electrolyzer technologies for hydrogen economy,” 2023, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99514-6.00003-0>.

- [13] Asociación Chilena del Hidrógeno, “Cadena de valor, almacenamiento.”, <https://h2chile.cl/almacenamiento/>.
- [14] Asociación Chilena del Hidrógeno, “Cadena de valor, distribución.”, <https://h2chile.cl/distribucion>.
- [15] Asociación Chilena del Hidrógeno, “Hidrógeno verde en Minería,” 2021, [https://h2chile.cl/wp-content/uploads/2021/11/20211118\\_H2V\\_Mineria-4.pdf](https://h2chile.cl/wp-content/uploads/2021/11/20211118_H2V_Mineria-4.pdf).
- [16] CICITEM, “Caso 02 | Transporte personas viajes de larga distancia regional,” 2023, <https://cicitem-casos.github.io/h2v/caso02.html>.
- [17] Ministerio de Energía, “Principales componentes.”, <https://energia.gob.cl/electromovilidad/vehiculos-electricos/principales-componentes#>.
- [18] Motorkote, “¿Qué es y como funciona un motor diesel?,” 2022, <https://motorkote.com.co/como-funciona-motor-diesel/>.
- [19] Definicion.de, “Diésel,” 2019, <https://definicion.de/diesel/>.
- [20] Lázaro, I., “Crearán un camión minero propulsado por pila de combustible de hidrógeno,” 2024, <https://inspenet.com/noticias/crearan-un-camion-minero-pila-de-hidrogeno/>.
- [21] Reborn Electric Motors, “Buses nuevos,” 2024, <https://rebornelectric.cl/busesnuevos/>.
- [22] H2News, “El primer piloto de bus a hidrógeno de Chile comenzará su etapa de pruebas,” 2023, <https://h2news.cl/2023/10/12/el-primer-piloto-de-bus-a-hidrogeno-de-chile-comenzara-su-etapa-de-pruebas/>.
- [23] Lázaro, I., “Fabricarán el primer bus a hidrógeno de Chile,” 2024, <https://inspenet.com/noticias/fabricaran-primer-bus-a-hidrogeno-de-chile/>.
- [24] Asociación Chilena del Hidrógeno, “Cadena de valor, regulación.”, <https://h2chile.cl/regulacion/>.
- [25] Sbroiavacca, N. *et al.*, “Proyecciones en el sector energía, para el análisis de los impactos de las acciones y políticas de mitigación,” 2018, [https://transparency-partnership.net/system/files/document/Modelo\%20LEAP\%20Taller\%20GIZ\%20Septiembre\%202018\\_Francisco.co\\_.pdf](https://transparency-partnership.net/system/files/document/Modelo\%20LEAP\%20Taller\%20GIZ\%20Septiembre\%202018_Francisco.co_.pdf).
- [26] Wang, M., “The greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation (greet) model: Version 1.5,” Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, 2008, <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/greet-greenhouse-gases-regulated-emissions-and-energy-use-transportation>.
- [27] Sá Riechi, J. L. d., Desarrollo de un modelo para la optimización del reemplazo de vehículos para una flota de transporte urbano de pasajeros. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2018.
- [28] GAMS, “CPLEX,” 2019, [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_CPLEX.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_CPLEX.html).
- [29] Balboa, V., “Estudio comparativo de impacto ambiental para la aplicación de vehículos eléctricos en minería, usando el análisis de ciclo de vida,” 2021, <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/56093/3560902039310UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [30] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, “¿Cómo llegar de Santiago a Valparaíso?,” <https://www.pucv.cl/uuaa/didactica-de-la-matematica/como-llegar-de-santiago-a-valparaiso>.
- [31] Revista Minería Chilena, “Camiones mineros. gigantes en tamaño y relevancia,” 2014, <https://www.revistamineria.cl/2014/05/camiones-mineros-gigantes-en-tamano-y-relevancia/>.

- [//www.dii.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/11/REVISTA-MINERIA-CHILENA-Camiones-mineros-gigantes-en-tamano-y-relevancia.pdf](http://www.dii.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/11/REVISTA-MINERIA-CHILENA-Camiones-mineros-gigantes-en-tamano-y-relevancia.pdf).
- [32] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, “Aplazamos por un año la renovación de vehículos que tienen vencimiento de antigüedad,” 2020, <https://www.mtt.gob.cl/archivos/26041>.
- [33] CODELCO, “Glosario de conceptos mineros,” <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/glosario.html>. s.f.
- [34] Soofastaei, A., Aminossadati, S., Kizil, M., y Knights, P., “A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption,” 2016.
- [35] Durán, B., Castellón, M., Chumacero, J., y Cruz, L., “Calculo de potencia eléctrica para un prototipo de auto eléctrico usado en rallies solares,” *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 19, no. 23, pp. 152–177, 2021.
- [36] Komatsu, “Camión minero 930e-5.”, <https://www.komatsu.com/en/products/trucks/electric-drive-mining-trucks/930e-5/#specifications>.
- [37] Google, “Google maps,” 2024, <https://www.google.com/maps>.
- [38] Horariobuses.cl, “Terminal de buses pajaritos,” 2023, <https://www.horariobuses.cl/terminal-de-buses-pajaritos>.
- [39] División de Transporte Público Regional, “Mediciones de demanda en servicios de transporte público urbano mayor de gran valparaíso,” 2016, [https://dtpr.cl/pdf/MenuSuperior/Estudios/V/3/Buses\\_Gran\\_Valpara%C3%ADso.pdf](https://dtpr.cl/pdf/MenuSuperior/Estudios/V/3/Buses_Gran_Valpara%C3%ADso.pdf).
- [40] Subsecretaría de Transportes, “Transporte público. parque vehiculares del país – abril 2021,” 2021, <https://usuarios.subtrans.gob.cl/estadisticas/parques-vehiculares.html>.
- [41] Ministerio de Energía, “Estado y electromovilidad,” 2019, <https://energia.gob.cl/electromovilidad/estado-y-electromovilidad>.
- [42] Quezada Bizama, F. N. *et al.*, “Análisis del consumo de combustible para una determinada flota de autobuses en Chile monitoreada a partir de datos de telemetría.”, 2023, <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11183>.
- [43] Taborelli, M., “Ya es factible una flota de buses a hidrógeno en Santiago,” 2023, <https://mobilityportal.lat/ya-es-factible-una-flota-de-buses-a-hidrogeno-en-santiago/>.
- [44] Movility Portal, “De mayor a menor autonomía estos son los buses eléctricos homologados en Chile,” 2022, <https://mobilityportal.lat/de-mayor-a-menor-autonomia-estos-son-los-buses-electricos-homologados-en-chile/>.
- [45] Energiminas, “Komatsu: Un camión minero puede valer us\$4.8 millones y hasta us\$250,000 la reparación de uno de sus componentes,” 2018, <https://energiminas.com/komatsu-un-camion-minero-puede-valer-us4-8-millones-y-hasta-us250000-una-reparacion/>.
- [46] Ministerio de Energía, “Carbono neutralidad en el sector energía, proyección de consumo energético nacional 2020,” 2020, [https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe\\_resumen\\_cn\\_2019\\_v07.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe_resumen_cn_2019_v07.pdf).
- [47] Sistema Nacional de Inversiones, “Informe precios sociales 2023,” 2023, <https://sni.gob.cl/stora>

- [ge/docs/230401\\_Informe\\_Precios\\_Sociales\\_2023\\_SNI.pdf](#).
- [48] Banco Central, “Economía internacional.”, [https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CA\\_P\\_EI/MN\\_EI11/EI\\_PROD\\_BAS](https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CA_P_EI/MN_EI11/EI_PROD_BAS).
  - [49] Global Petrol Prices, “Chile precios del diesel,” 2024, [https://es.globalpetrolprices.com/Chile/diesel\\_prices/](https://es.globalpetrolprices.com/Chile/diesel_prices/).
  - [50] EIA, “Price components: Diesel: End-user price,” 2023, <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/>.
  - [51] Bernal, G., “Industria del hidrógeno verde: costos de producción,” 2021, [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32538/1/BCN\\_\\_\\_\\_Hidrogeno\\_verde\\_Costos\\_de\\_produccion\\_Sept21.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32538/1/BCN____Hidrogeno_verde_Costos_de_produccion_Sept21.pdf).
  - [52] Asociación Chilena del Hidrógeno, “Cadena de valor: Costos de producción h2,” 2021, <https://h2chile.cl/cadena-de-valor/>.
  - [53] Global Petrol Prices, “Electricity prices,” 2023, [https://www.globalpetrolprices.com/electricity\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/).
  - [54] Statista, “Projected average end-use electricity price in the united states from 2022 to 2050,” 2023, <https://www.statista.com/statistics/630136/projection-of-electricity-prices-in-the-us/>.

# Anexos

## Anexo A. Antecedentes

### A.1. Almacenamiento de hidrógeno

Tipo de Tanque	Presión máxima [bar]	Construcción	W%	Aplicaciones
Tipo I	300	Completamente de acero o aluminio	<2	Aplicaciones estacionarias como laboratorios o uso en industria química.
Tipo II	200	Aluminio recubierto parcialmente con capa fibra de vidrio	<3	Aplicaciones estacionarias como hidrogeneras
Tipo III	700	Aluminio recubierto completamente con fibra de vidrio o carbono	<5	Aplicaciones móviles como vehículos con celdas de combustible
Tipo IV	700	Fibra de carbono con revestimiento polimérico	<10	Aplicaciones móviles como vehículos con celdas de combustible
Tipo V	1000	Únicamente fibra de carbono	-10	Investigación, industria aeroespacial

Figura A.1: Cuadro comparativo entre los distintos tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido [13].



Figura A.2: Camión Tube Trailer [13].



Figura A.3: Dispensador de hidrógeno gaseoso de NEL [3].

## Anexo B. Resultados

### B.1. Cálculo de factor de emisiones

$$Emisiones_{CO_2, CH_4, N_2O} = FE[kg/TJ] \cdot FG EI \cdot FPCI \quad (B.1)$$

$$Emisiones CO_{2eq} = (Emisiones CO_{2diesel} + Emisiones CH_{4diesel} + Emisiones N_2O_{diesel}) \left[ \frac{kgCO_{2eq}}{TJ} \right] \cdot \left[ \frac{1TJ}{1\,000\,000\,000kJ} \right] \cdot \left[ \frac{3600kJ}{1kWh} \right] \cdot \rho_{vol} \left[ \frac{kWh}{l} \right] \quad (B.2)$$

Tabla B.1: Factor de emisiones de CO<sub>2</sub>eq.

Energético	CO <sub>2</sub> eq	Unidad
Diésel	2.62	kgCO <sub>2</sub> eq/l

## B.2. Propiedades energéticas

Tabla B.2: Rendimiento de componentes principales en vehículos diésel, hidrógeno y eléctrico.

<b>Transporte</b>	$\eta_T$	$\eta_{motor}$	$\eta_{batería}$	$\eta_{celdaH_2}$	$\eta_{recuperación}$
Diésel	0.9	0.45	0.00	0.00	0.00
Hidrógeno	0.98	0.89	0.90	0.60	0.20
Eléctrico	0.98	0.89	0.90	0.00	0.20

Tabla B.3: Propiedades energéticas

Energético	$\rho_{volumétrica}$ [kWh/l]	$\rho_{gravimétrica}$ [kWh/kg]	$\rho_{comb}$ [kg/l]	PCI[kJ/kg]
Diésel	8.89	11.94	0.85	43 000
Hidrógeno	1.56	33.33	0.042	120 000
Electricidad	0.46	0.17	0.001	600

Tabla B.4: Datos intrínsecos de cada vehículo

Transporte	$m_{empty}$ [kg]	$m_{full}$ [kg]	$m_{prom}$ [kg]	$A_{front}$ [m <sup>2</sup> ]	$C_d$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	f	$\delta$
CAEX	231 331	521 640	376 486	56.02	0.8	1.29	0.03	1.1
Bus	18 500	21 650	20 075	7.875	0.633	1.29	0.015	1.1
Minibus	9 400	11 080	10 240	7.772	0.6	1.29	0.015	1.1

## B.3. Ciclos de conducción

Tabla B.5: Distancia recorrida por tramo en cada caso.

<b>Demanda</b>	<b>Tramo</b>	<b>Distancia[km]</b>
Mina	a	1.447
Mina	b	1.611
Mina	c	1.611
Mina	d	1.447
Stgo-Valp	a	54.63
Stgo-Valp	b	55.84
Stgo-Valp	c	55.84
Stgo-Valp	d	54.63
L702	a	7.55
L702	b	3.5
L702	c	3.5
L702	d	8.02

## B.4. Límite de emisiones

Tabla B.6: Velocidad promedio obtenida en cada caso.

<b>Demanda</b>	<b>Tramo</b>	$v_{prom}$ [km/h]
Mina	a	10.00
Mina	b	8.00
Mina	c	30.00
Mina	d	35.00
Stgo-Valp	a,b,c,d	73.65
L702	a,b,c,d	15.00

Tabla B.7: Pendientes utilizadas en cada tramo.

<b>Demanda</b>	<b>Tramo</b>	<b>Ángulo pendiente[rad]</b>
Mina	a	0.10
Mina	b	0.12
Mina	c	-0.12
Mina	d	-0.10
Stgo-Valp	a	0.15
Stgo-Valp	b	0.19
Stgo-Valp	c	-0.19
Stgo-Valp	d	-0.15
L702	a	0.03
L702	b	0.22
L702	c	-0.22
L702	d	0.04

Tabla B.8: Emisiones iniciales de CO2 equivalente para cada demanda, según la cantidad inicial de cada flota.

<b>Demanda</b>	<b>Año</b>	<b>Emisiones</b>	<b>Unidad</b>
Mina	2023	110 000	t-CO2/año
Stgao-Valp	2023	4 862	t-CO2/año
L702	2023	491	t-CO2/año

## B.5. Costos

Tabla B.9: Costo de estación por tipo de energético [Elaboración propia]

<b>Energético</b>	<b>Costo estación</b>	<b>Unidad</b>
Diésel	0	USD/veh
Hidrógeno	60 000	USD/veh
Electricidad	15 000	USD/veh

Tabla B.10: Costo de inversión de cada vehículo por tipo de energético [Elaboración propia [43] [45] [46] [47] ]

Vehículo	Energético	Costo inversión	Unidad
Camión	Diésel	4 000 000	USD/un
Camión	Hidrógeno	6 218 750	USD/un
Camión	Electricidad	7 000 000	USD/un
Bus interurbano	Diésel	233 179	USD/un
Bus interurbano	Hidrógeno	381 415	USD/un
Bus interurbano	Electricidad	220 290	USD/un
Minibus urbano	Diésel	115 730	USD/un
Minibus urbano	Hidrógeno	266 641	USD/un
Minibus urbano	Electricidad	222 201	USD/un

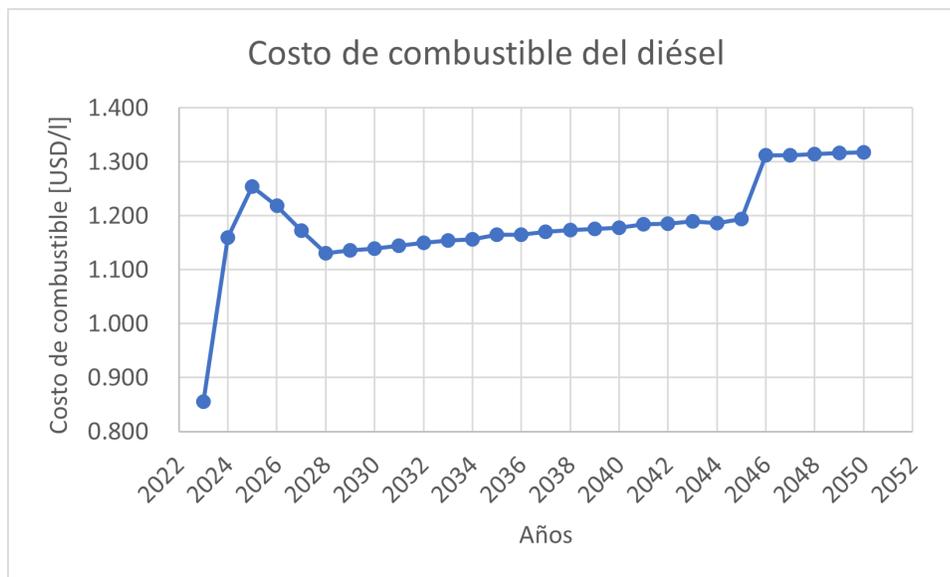


Figura B.1: Costo de combustible diésel entre 2023-2050 [Elaboración propia a partir de [48], [49] [50]].



Figura B.2: Costo de combustible hidrógeno entre 2023-2050 [Elaboración propia a partir de [51], [52]].

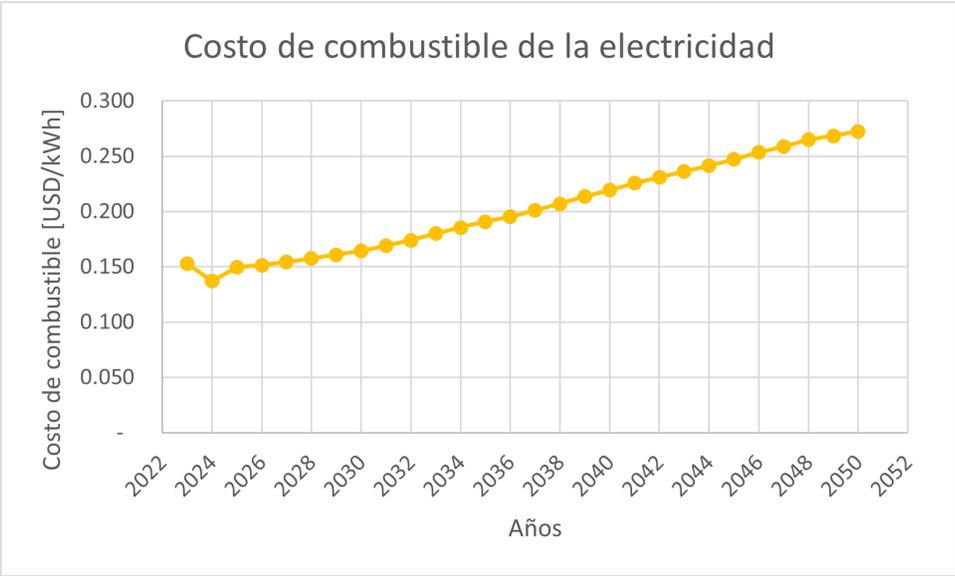


Figura B.3: Costo de combustible electricidad entre 2023-2050 [Elaboración propia a partir de [53], [54]].

Tabla B.11: Costo de combustible para cada energético al año [Elaboración propia a partir de [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54]].

<b>Año</b>	<b>Comb.</b>	<b>Costo</b>	<b>Un</b>	<b>Comb.</b>	<b>Costo</b>	<b>Un</b>	<b>Comb.</b>	<b>Costo</b>	<b>Un</b>
2023	Diésel	0.856	\$/l	H2	3.000	\$/kgh2	Eléctrico	0.153	\$/kWh
2024	Diésel	1.160	\$/l	H2	2.850	\$/kgh2	Eléctrico	0.137	\$/kWh
2025	Diésel	1.254	\$/l	H2	2.600	\$/kgh2	Eléctrico	0.150	\$/kWh
2026	Diésel	1.219	\$/l	H2	2.470	\$/kgh2	Eléctrico	0.152	\$/kWh
2027	Diésel	1.173	\$/l	H2	2.347	\$/kgh2	Eléctrico	0.155	\$/kWh
2028	Diésel	1.131	\$/l	H2	2.229	\$/kgh2	Eléctrico	0.158	\$/kWh
2029	Diésel	1.136	\$/l	H2	2.118	\$/kgh2	Eléctrico	0.161	\$/kWh
2030	Diésel	1.139	\$/l	H2	1.800	\$/kgh2	Eléctrico	0.165	\$/kWh
2031	Diésel	1.145	\$/l	H2	1.710	\$/kgh2	Eléctrico	0.169	\$/kWh
2032	Diésel	1.150	\$/l	H2	1.625	\$/kgh2	Eléctrico	0.174	\$/kWh
2033	Diésel	1.154	\$/l	H2	1.543	\$/kgh2	Eléctrico	0.180	\$/kWh
2034	Diésel	1.157	\$/l	H2	1.520	\$/kgh2	Eléctrico	0.186	\$/kWh
2035	Diésel	1.164	\$/l	H2	1.500	\$/kgh2	Eléctrico	0.191	\$/kWh
2036	Diésel	1.165	\$/l	H2	1.425	\$/kgh2	Eléctrico	0.195	\$/kWh
2037	Diésel	1.170	\$/l	H2	1.354	\$/kgh2	Eléctrico	0.201	\$/kWh
2038	Diésel	1.174	\$/l	H2	1.330	\$/kgh2	Eléctrico	0.207	\$/kWh
2039	Diésel	1.176	\$/l	H2	1.310	\$/kgh2	Eléctrico	0.214	\$/kWh
2040	Diésel	1.178	\$/l	H2	1.300	\$/kgh2	Eléctrico	0.220	\$/kWh
2041	Diésel	1.185	\$/l	H2	1.270	\$/kgh2	Eléctrico	0.226	\$/kWh
2042	Diésel	1.185	\$/l	H2	1.240	\$/kgh2	Eléctrico	0.231	\$/kWh
2043	Diésel	1.190	\$/l	H2	1.220	\$/kgh2	Eléctrico	0.236	\$/kWh
2044	Diésel	1.187	\$/l	H2	1.210	\$/kgh2	Eléctrico	0.241	\$/kWh
2045	Diésel	1.194	\$/l	H2	1.200	\$/kgh2	Eléctrico	0.247	\$/kWh
2046	Diésel	1.312	\$/l	H2	1.800	\$/kgh2	Eléctrico	0.254	\$/kWh
2047	Diésel	1.313	\$/l	H2	1.600	\$/kgh2	Eléctrico	0.259	\$/kWh
2048	Diésel	1.314	\$/l	H2	1.400	\$/kgh2	Eléctrico	0.265	\$/kWh
2049	Diésel	1.317	\$/l	H2	1.300	\$/kgh2	Eléctrico	0.268	\$/kWh
2050	Diésel	1.317	\$/l	H2	1.100	\$/kgh2	Eléctrico	0.273	\$/kWh