

EVALUACIÓN VIABILIDAD

Técnico-Económica en la Implementación **HIDRÓGENO VERDE** en el Transporte Pesado de Carga y Pasajeros





cityPlanning



“Agradecemos sinceramente a las siguientes empresas por su valiosa colaboración en el marco del estudio “Evaluación de Viabilidad Técnico-Económica en la Implementación de Hidrógeno Verde en el Transporte Pesado de Carga y Pasajeros”, desarrollado por la Agencia de Sostenibilidad Energética y el Ministerio de Energía de Chile.

Su disposición para compartir información técnica y comercial sobre vehículos impulsados por hidrógeno, así como antecedentes logísticos sobre las operaciones habituales de sus flotas —incluyendo recorridos, distancias y características de servicio— fue fundamental para el desarrollo de este análisis.

Valoramos profundamente la confianza depositada en nuestro trabajo y la apertura con la que compartieron datos clave, lo que permitió enriquecer significativamente la evaluación de escenarios y necesidades del sector transporte en Chile.

Esta colaboración constituye un aporte relevante para avanzar hacia una transición energética más informada, eficiente y alineada con los desafíos de descarbonización del país.”

turbus



SOTRASER



Bretti
TRANSPORTE & DISTRIBUCIÓN
www.bretti.cl



Resumen Ejecutivo

Contexto, Objetivo y Estado del Arte

El sector transporte en Chile es responsable de aproximadamente el 25% de las emisiones de GEI, siendo el transporte pesado de carga y pasajeros uno de los mayores emisores. La dependencia del diésel y el crecimiento del parque automotor demandan medidas urgentes para la descarbonización. En este escenario, el hidrógeno verde aparece como una alternativa estratégica, gracias al potencial del país para producirlo de forma competitiva utilizando fuentes renovables.

Este estudio busca entregar herramientas para la toma de decisiones sobre el potencial rol del H2V en transporte pesado, considerando aspectos técnicos, económicos, regulatorios y sociales, con foco en las Regiones de Antofagasta y Biobío.

El estudio comienza con un levantamiento detallado del Estado del Arte del Hidrógeno Verde aplicado al transporte de carga y pasajeros, en donde se repasa al hidrógeno tanto como combustible puro, como en sus derivados: metanol, amoníaco, diésel sintético, entre otros. De los cuales, se señalan a su vez, sus procesos de producción y características principales. También se realiza un levantamiento de las diferentes tecnologías de movilidad asociadas al uso del hidrógeno en donde se detallan principalmente a los Vehículos Eléctricos con Pilas de Combustible (FCEV), así como a los Vehículos con Motores de Combustión Interna (ICEV) alimentados con hidrógeno puro o derivados.

El análisis continúa con la descripción de las características técnicas de las tecnologías, desde las pilas de combustibles, pasando por los estanques de hidrógeno, baterías y motores eléctricos, así como sistemas de gestión energética y sistemas de carga.

El levantamiento del estado del arte termina con el análisis del contexto internacional, en donde se observan las últimas tendencias de uso de hidrógeno en el mundo, observándose los mayores usos en el continente asiático y con ejemplos interesantes de casos de estudio, además de observar algunas experiencias de políticas de países en Europa, Estados Unidos y China. Posteriormente, se revisan los avances hasta la fecha en Chile, en donde se repasan las expectativas de desarrollo del hidrógeno y se señalan algunas iniciativas de estudios realizados como las evaluaciones de implementación de hidrógeno en el sistema RED, así como los casos pilotos de buses y camiones en el país.

Levantamiento de Parque Existente, Proveedores y Fabricantes

El estudio ahonda en caracterizar el parque existente en Chile tanto de buses como de camiones de carga, identificando la existencia de 62.104 buses y 254.216 camiones de carga en operación en la actualidad. De estos vehículos se identifican sus principales tipos, su distribución regional, su clasificación en cuanto a emisiones, así como sus costos de inversión típicos. Estos valores luego son contrastados con un levantamiento tanto de buses como camiones a hidrógeno en el mundo, sus principales marcas, origen de fabricación, características técnicas y costos de inversión, en base a bibliografía publicada, así como a la experiencia levantada de los pilotos implementados en el país. Se observa que los costos de vehículos a hidrógeno superan en 2 a 3 veces los costos de los vehículos tradicionales en operación en el país.

De forma similar también se realiza una revisión de los sistemas de carga de hidrógeno, identificando fabricantes, características técnicas, costos y localización de fabricantes alrededor del mundo. En este punto, se puede observar que la mayor parte del desarrollo de infraestructura de carga se ha llevado a cabo en el hemisferio norte con los principales avances en Asia y Europa.

Brechas y Barreras Identificadas

El despliegue masivo de tecnologías con H₂V enfrenta importantes desafíos, que abarcan toda la cadena de valor del hidrógeno. Así se observan dificultades importantes asociadas a la producción de hidrógeno verde que aún no se materializa en el país en forma masiva y solo existen a la fecha prototipos traduciéndose aún en costos elevados del Kg de hidrógeno al usuario final. Así como también complejidades asociadas al almacenamiento del hidrógeno, su transporte y la disposición para su uso final en vehículos.

También se abordan las diferentes barreras de tipo económicas y financieras, institucionales y regulatorias, técnicas y de infraestructura, sociales y ambientales, así como de capital humano. Todas estas se detallan y discuten de cara a buscar soluciones que se deben desarrollar en el país tanto a nivel de desarrollo de política pública como de desarrollo propio del mercado.

Cabe destacar las brechas normativas, las cuales se ahondan en detalle en un capítulo específico, haciendo una revisión de la normativa existente y el trabajo futuro que se requiere para el correcto desarrollo de la industria de transporte de hidrógeno en el país.

Análisis de Casos de Aplicación

Posterior al análisis normativo, se presenta un estudio comparativo de casos de estudio de 4 rutas reales de vehículos de carga y de transporte de pasajeros simulados en 2 regiones del país: Antofagasta y Biobío. El análisis desarrollado ha buscado comparar el desempeño energético de vehículos tradicionales a diésel en relación a vehículos eléctricos con pilas de combustible (FCEV) alimentados con hidrógeno.

Los resultados indican que, si bien los vehículos a H₂V son más eficientes en el uso de la energía y sus costos de operación podrían llegar a ser competitivos con los costos esperados del H₂V, su TCO (Total Cost of Ownership) está lejos de poder competir con los vehículos diésel si no se reducen los costos de inversión en, al menos, un 50% para 2030. La viabilidad económica de pilotos en las condiciones actuales de costo de inversión y energía pasa por subsidios de entre el 65% y el 75%. Desde el punto de vista operativo, hay que mencionar que si bien los camiones analizados presentan autonomías que les permiten operar las rutas simuladas sin repostar, no sucede esto con los buses, lo que obligaría a disponer de una infraestructura de recarga más dispersa y que a su vez involucra costos adicionales.

Conclusiones

El hidrógeno verde representa una solución estratégica para avanzar en la descarbonización del transporte pesado en Chile. Si bien enfrenta barreras significativas, los resultados del estudio muestran que su competitividad es alcanzable en escenarios de mediano plazo, especialmente en segmentos de alto kilometraje y zonas donde se pueda integrar producción y consumo local.

Una transición exitosa requiere voluntad política, planificación estratégica, instrumentos de fomento adecuados y colaboración multisectorial. El momento de actuar es ahora, para que Chile consolide su liderazgo regional en tecnologías limpias aplicadas al transporte.

Índice de Contenido

Resumen Ejecutivo	4
1 Introducción	21
1.1 Contexto	21
1.2 Objetivos del Proyecto	22
1.3 Alcance	22
2 Levantamiento Estado del Arte del H2V Aplicado en el Transporte de Carga y Pasajeros	25
2.1 Planteamiento	25
2.2 El Hidrógeno y Combustibles Derivados	27
2.2.1 Introducción	27
2.2.2 Metanol.....	28
2.2.3 Diésel Sintético.....	30
2.2.4 Conclusiones	32
2.3 Tecnologías de Movilidad Asociadas al Uso de Hidrógeno	33
2.3.1 Introducción	33
2.3.2 Vehículos Eléctricos con Pila de Combustible (FCEV).....	34
2.3.3 Vehículos con Motores de Combustión Interna (ICEV)	40
2.4 Características Técnicas de las Tecnologías	42
2.4.1 Pilas de Combustible.....	42
2.4.2 Estanque de Hidrógeno	47
2.4.3 Baterías Eléctricas.....	52
2.4.4 Motores Eléctricos	52
2.4.5 Sistemas de gestión energética	54
2.4.6 Motores Alternativos de Combustión Interna	55
2.4.7 Sistemas de Carga	60
2.5 Contexto Internacional	66
2.5.1 Consumo de Hidrógeno en el Sector Transporte	66
2.5.2 Stock de Vehículos.....	67
2.5.3 Estaciones de Carga.....	68
2.5.4 Almacenamiento del Hidrógeno	69
2.5.5 Competitividad.....	69
2.5.6 Proyección de Costos	70

2.5.7	Casos de Estudio.....	72
2.5.8	Incentivos y Políticas Públicas.....	78
2.6	Contexto Nacional	81
2.6.1	Estrategia Nacional y Plan de Acción de Hidrógeno Verde.....	81
2.6.2	Acciones Desarrolladas o en Curso.....	82
3	Levantamiento de Antecedentes de Fabricantes y Proveedores	88
3.1	Buses de Transporte de Pasajeros	88
3.1.1	Buses Actualmente en Operación.....	88
3.1.2	Buses a Hidrógeno	93
3.2	Camiones de Transporte de Carga.....	98
3.2.1	Camiones Actualmente en Operación.....	98
3.2.2	Camiones a Hidrógeno	106
3.3	Sistemas de Carga de Hidrógeno para Buses de Transporte de Pasajeros y Camiones de Transporte de Carga.....	115
3.3.1	Fabricantes y Características Técnicas	115
3.3.2	Costos.....	116
3.3.3	Ubicación de Fabricantes	118
4	Análisis de Brechas a Nivel Nacional y Barreras de Entrada al País	120
4.1	Producción de Hidrógeno Verde.....	121
4.2	Almacenamiento	121
4.3	Transporte	122
4.4	Uso Final	123
4.5	Brechas y Barreras en el Uso del Hidrógeno en Transporte	124
4.5.1	Barreras Económicas y Financieras	127
4.5.2	Barreras Institucionales y Regulatorias.....	128
4.5.3	Barreras Técnicas y de Infraestructura	129
4.5.4	Barreras Sociales y Ambientales	130
4.5.5	Barreras de Capital Humano.....	131
5	Análisis de Problemática a Nivel Normativo.....	133
5.1	Necesidades del Proyecto para Obtención de Permisos	136
5.2	Normativa Aplicada al Sistema de Carga	142
5.2.1	Antecedentes Generales	142
5.2.2	Solicitud de Proyecto Especial según SEC	143

5.3	Normativa Aplicada a Camiones y Buses a Hidrógeno	144
5.3.1	Proceso de Importación e Implementación de Vehículos Pesados.....	145
5.4	Duración de los Procesos.....	161
5.4.1	Proceso de Importación e Implementación	161
5.4.2	Capacitación Personal	163
6	Análisis de Casos de Aplicación	165
6.1	Planteamiento y Metodología.....	165
6.1.1	Introducción	165
6.1.2	Casos de Análisis y Sensibilización de Variables.....	166
6.1.3	Desarrollo de los Indicadores	168
6.1.4	Hipótesis de Cálculo de Indicadores de Análisis	169
6.2	Justificación Regiones a Analizar	174
6.3	Contexto de Regiones de Antofagasta y Biobío desde el punto de Vista de Transporte.....	175
6.3.1	Crecimiento Histórico Poblacional	175
6.3.2	Evolución Histórica de Permisos de Circulación y Tipo de Motorización	178
6.3.3	Composición Vehicular	182
6.3.4	Identificación de Principales Rutas	185
6.3.5	Catastro de Estaciones de Servicio	189
6.3.6	Identificación Principales Actividades Económicas.....	193
6.4	Metodología de Simulación de Consumo Energético.....	195
6.4.1	Modelo Físico del Vehículo en Movimiento	196
6.4.2	Trabajo y Energía	200
6.4.3	Cálculo del Consumo	201
6.4.4	Cálculos Preliminares.....	205
6.4.5	Parámetros del Modelo.....	207
6.5	Descripción de los Casos Centrales	216
6.5.1	Ruta 1: Transporte de combustible Antofagasta - Chuquicamata. Región de Antofagasta.....	216
6.5.2	Ruta 2: Transporte de carga Región del Biobío.....	217
6.5.3	Ruta 3: Bus Interurbano Antofagasta - Calama. Región de Antofagasta	219
6.5.4	Ruta 4: Bus Interurbano Concepción - Chillán. Región del Biobío	220
6.6	Resultados.....	222
6.6.1	Resultados Comparativos de los Casos Centrales	222
6.6.2	Sensibilización Técnica del Consumo de Energía	229

6.6.3	Sensibilización del TCO con los Costos de la Energía y de Inversión.....	232
6.6.4	Estimación y Sensibilización del OPEX con los Costos de la Energía.	234
6.6.5	Subsidio de la Inversión.....	237
6.6.6	Análisis Comparativo Entre Regiones	238
7	Conclusiones	240
7.1	Introducción	240
7.2	Transporte de Carga.....	240
7.3	Transporte de Pasajeros.....	241
7.4	Resultados.....	241
8	Recomendaciones	243
9	Anexos.....	245
9.1	Vehículos a Hidrógeno.....	245
9.1.1	Precios referenciales camiones diésel	245
9.1.2	Folletos de Vehículos a Hidrógeno	250
9.2	Normativa Aplicable para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de la SEC	248
9.3	Cálculo de trabajo y energía.....	252
9.3.1	Integración de la ecuación de movimiento.....	252
9.3.2	Energía cinética.....	252
9.3.3	Energía de tracción.....	253
9.3.4	Trabajo de la fuerza del viento	253
9.3.5	Trabajo de la resistencia a la rodadura	256
9.3.6	Trabajo de la fuerza de gravedad	257
9.4	Justificación de los valores y parámetros estimados del modelo de cálculo de consumos	258
9.5	Perfiles de Elevación principales rutas regiones de Antofagasta y del Biobío.....	259
9.5.1	Rutas Región de Antofagasta	259
9.5.2	Rutas Región del Biobío	266
10	Referencias.....	281

Índice de Tablas

Tabla 2-1: TRL actuales de tecnologías requeridas para el desarrollo del e-metanol	30
Tabla 2-2: <i>TRL actuales de tecnologías requeridas para el desarrollo del e-diésel</i>	32
Tabla 2-3: <i>Propiedades de los diferentes combustibles basados en hidrógeno</i>	33
Tabla 2-4: Características de tipos de pilas de combustibles más utilizadas en transporte de carga y pasajeros.....	37
Tabla 2-5: Generalidades de servicios y características técnicas para líneas de buses	37
Tabla 2-6: Generalidades de servicios y características técnicas para tipos de camiones.....	38
Tabla 2-7: Ejemplos de camiones FC comerciales	39
Tabla 2-8: Comparativa de tipos de vehículos de transporte de carga y pasajeros con sus principales características	39
Tabla 2-9: Resumen de características principales de tipos de pilas de combustibles	43
Tabla 2-10: Resumen de características principales de los tipos de tanques de hidrógeno.....	50
Tabla 2-11: Características principales de baterías eléctricas utilizadas en electromovilidad	52
Tabla 2-12 Motores más utilizados en electromovilidad.....	53
Tabla 2-13: Diferencias de los ICE para Ciclo Otto y Diésel con Metanol	57
Tabla 2-14: Ventajas y desventajas de la utilización de metanol en ICE	57
Tabla 2-15: Diferencias de los ICE para Ciclo Otto y Diésel con H2 puro	58
Tabla 2-16: Ventajas y desventajas de la utilización de H2 puro en ICE	59
Tabla 2-17: Ventajas y desventajas de la utilización de Diésel sintético en ICE	60
Tabla 3-1: Buses PRT 2023 según tipo de vehículo	88
Tabla 3-2: Buses PRT 2023 según tipo de servicio	88
Tabla 3-3: Flota de Buses RNTP a Nivel Nacional según Región.....	90
Tabla 3-4: Flota de Buses RNTP a Nivel Nacional según Norma de Emisiones	91
Tabla 3-5: Precios buses Licitación de compra de flota sistema RED (USD).....	91
Tabla 3-6: Marcas y modelos de buses a hidrógeno – Primera Parte.....	94
Tabla 3-7: Marcas y modelos de buses a hidrógeno – Segunda Parte	95
Tabla 3-8: Marcas y modelos de camiones a hidrógeno – Parte 1	107
Tabla 3-9: Marcas y modelos de camiones a hidrógeno – Parte 2	108
Tabla 3-10: Precios Referenciales de camiones a hidrógeno Clase 8	112
Tabla 3-11: Comparación de consumo camiones ICE y FCEV	113
Tabla 3-12: Fabricantes y proveedores de estaciones de carga de hidrógeno	115
Tabla 3-13: Costos analizados por capacidad de dispensación.....	117
Tabla 4-1: Análisis FODA en fase de producción del hidrógeno verde	121
Tabla 4-2: Análisis FODA en fase de almacenamiento del hidrógeno verde.....	122

Tabla 4-3: Análisis FODA en fase de transporte del hidrógeno verde.....	122
Tabla 4-4: Análisis FODA en fase de utilización del hidrógeno verde	123
Tabla 5-1: Clasificación entre vehículos livianos, medianos y pesados según criterio	145
Tabla 5-2: Límite de Pesos Máximos por Eje para Vehículos en Caminos Públicos.....	147
Tabla 5-3: Límites de emisiones para Motores Diesel, D.S N°55 – Veh. Pesados	151
Tabla 5-4: Límites de emisiones según norma Euro VI.....	152
Tabla 5-5: Comparativa de Límites de Emisiones: Decreto N° 55, Decreto N° 130 y Norma EURO VI.....	152
Tabla 5-6: Límites de Emisión de Ruido para Buses de locomoción colectiva, Según Decreto 129 .	153
Tabla 6-1: Esquema de la tabla de casos a evaluar	167
Tabla 6-2: Costo de mantenimiento de distintos vehículos	170
Tabla 6-3: Crecimiento histórico poblacional a nivel nacional y en las regiones de Antofagasta y del Biobío	175
Tabla 6-4: Tasas anuales de crecimiento poblacional a nivel nacional y de las regiones de Antofagasta y del Biobío.....	176
Tabla 6-5: Crecimiento histórico poblacional a nivel comunal en la Región de Antofagasta.	176
Tabla 6-6: Tasas de crecimiento poblacional anual a nivel comunal en la región de Antofagasta. ...	177
Tabla 6-7: Crecimiento histórico poblacional a nivel ciudad en la Región del Biobío y la ciudad de Chillán.	177
Tabla 6-8: Tasas de crecimiento poblacional anual a nivel ciudad en la Región del Biobío y la ciudad de Chillán.	178
Tabla 6-9: Crecimiento histórico de Permisos de Circulación en las regiones de Antofagasta y del Biobío.	178
Tabla 6-10: Crecimiento histórico de Permisos de Circulación a nivel comunal en la región de Antofagasta.	179
Tabla 6-11: Crecimiento histórico Permisos de Circulación en las principales ciudades de la región del Biobío y la ciudad de Chillán.	179
Tabla 6-12: Evolución de la proporción del tipo de motorización en las regiones de Antofagasta y del Biobío.	180
Tabla 6-13: Estimación evolución de proporción del tipo de motorización a nivel comunal en Región de Antofagasta.	181
Tabla 6-14: Estimación evolución de proporción del tipo de motorización a nivel comunal en Región de Biobío y ciudad de Chillán.	181
Tabla 6-15: Revisiones técnicas aprobadas por tipo de vehículo el año 2024 en la Región de Antofagasta.	182
Tabla 6-16: Año de fabricación y kilometraje promedios por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la Región de Antofagasta.	182
Tabla 6-17: Revisiones técnicas aprobadas por tipo de vehículo el año 2024 en la región del Biobío.	184
Tabla 6-18: Año de fabricación y kilometraje promedios por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la región del Biobío.	184

Tabla 6-19: Principales rutas Región de Antofagasta, su longitud y sectores que conecta.....	186
Tabla 6-20: Principales rutas Región del Biobío y ciudad de Chillán, su longitud y sectores que conecta.	187
Tabla 6-21: Datos, Parámetros y variables del modelo de consumo energético.	195
Tabla 6-22: Valores típicos para el coeficiente de rodadura.	200
Tabla 6-23: Datos y Parámetros del modelo de consumo energético.	208
Tabla 6-24: Características del vehículo de referencia del Caso 1 de transporte de carga.....	210
Tabla 6-25: Parámetros de vehículos a diésel del modelo.....	211
Tabla 6-26: Características del vehículo a Hidrógeno para transporte de carga en caso de estudio.	214
Tabla 6-27: Estimación de costo para vehículo a Hidrógeno para transporte de carga en caso de estudio.	215
Tabla 6-28: Parámetros de vehículos a Hidrógeno del modelo.....	215
Tabla 6-29: Rutas simuladas.....	222
Tabla 6-30: Resultados técnicos de la simulación de vehículos diésel.	223
Tabla 6-31: Resultados técnicos de la simulación de vehículos con Fuel Cell.....	223
Tabla 6-32: TCO para todas las rutas en tres horizontes temporales distintos.....	224
Tabla 9-1: Precios Referenciales Tractocamiones Diésel.....	246
Tabla 9-2: Precios Referenciales Camiones Diésel.....	247

Índice de Figuras

Figura 1-1: Distribución de Emisiones de GEI sector Transporte año 2020	21
Figura 2-1: Comparativa de tecnologías de propulsión alternativas para camiones pesados	26
Figura 2-2: Producción de metanol.....	29
Figura 2-3: <i>Producción de e-diésel vía Proceso Fischer-Tropsch</i>	31
Figura 2-4: <i>Comparativa rendimientos ICE vs FCEV</i>	34
Figura 2-5: Componentes principales de un Vehículo Eléctrico con Pila de Combustible alimentado con metanol o con hidrógeno (FCEV)	35
Figura 2-6: Componentes principales de un vehículo con motor de combustión interna (ICEV)	40
Figura 2-7: Densidad energética por unidad de masa y volumen de varios combustibles químicos ...	48
Figura 2-8: Ejemplo de ubicación de tanques de hidrógeno en un bus de pasajeros.....	49
Figura 2-9: Tipos de tanques de hidrógeno	49
Figura 2-10: Esquema interior de estanque de almacenamiento de hidrógeno líquido	51
Figura 2-11 Esquema generalizado de gestión energética.	54
Figura 2-12: Esquema de funcionamiento de un ICE. Arriba: con Ciclo Otto. Abajo: con Ciclo Diésel	56
Figura 2-13: Representación esquemática de una estación de carga.....	61
Figura 2-14: Estación de carga fija inaugurada en Chile en 2023 por COPEC	63
Figura 2-15: Estación de carga móvil	64
Figura 2-16: Estación de carga de hidrógeno gaseoso.....	65
Figura 2-17: Estación de carga de hidrógeno líquido.....	65
Figura 2-18: Consumo mundial de Hidrógeno en el sector transporte	67
Figura 2-19: Número de vehículos en base a Pilas de Hidrógeno (en miles de unidades).....	67
Figura 2-20: Número de modelos disponibles de buses y camiones de carga por región.....	68
Figura 2-21: Número de estaciones de carga en operación de FCEVs por países en el mundo.....	69
Figura 2-22: Factores influyentes en la costo-competitividad del hidrógeno	70
Figura 2-23: Costo Total de Propiedad (TCO) para camiones de carga	71
Figura 2-24: Costo Total de Propiedad (TCO) para buses de pasajero	72
Figura 2-25: Costos Totales de Propiedad (TCO) para caso de estudio de flota de camiones en Eslovaquia	73
Figura 2-26: Costos Totales de Propiedad (TCO) para caso de estudio de flota de camiones en Italia-Alemania	74
Figura 2-27: Costos Totales de Propiedad (TCO) para caso de estudio de flota de camiones en Inglaterra	75
Figura 2-28: TCO para caso estudio de flota de 5 buses en New Jersey, Estados Unidos (2023).....	76
Figura 2-29: TCO para caso estudio de flota de 100 buses en New Jersey, Estados Unidos (2028)..	77
Figura 2-30: Costos Totales de Uso (TCU) para caso de estudio de flota de buses en Austria	78

Figura 2-31: Costo Totales de Propiedad (TCO) comparativo para flota de buses RED en Santiago .	83
Figura 2-32: Modelo de bus a hidrógeno de fabricación chilena	85
Figura 2-33: Camión a Hidrógeno piloto de Walmart Chile	86
Figura 2-34: Camión a Hidrógeno piloto de Sotraser	87
Figura 2-35: Estación de carga de hidrógeno de COPEC-Linde en Pudahuel	87
Figura 3-1: Tipología de Buses de Transporte Público Urbano.....	90
Figura 3-2: Totales de Ventas de Buses entre los años 2014 y 2023	92
Figura 3-3: Total de Ventas de Buses entre los años 2014 y 2023 según Marca.....	92
Figura 3-4: Relación costo de adquisición de buses de 12 metros según tipo de propulsión vs buses Diésel en USA.....	96
Figura 3-5: Costo de adquisición de buses a hidrógeno vs buses Diésel según literatura (EUR)	97
Figura 3-6: Relación costo de adquisición de buses a hidrógeno vs buses Diésel según literatura ...	97
Figura 3-7: Costo de adquisición promedio buses a hidrógeno vs buses Diésel según literatura (EUR)§	98
Figura 3-8: Cantidad de Camiones según Marca, PRT 2023.....	99
Figura 3-9: Partición de Marcas Más Relevantes de Camiones según Año de Fabricación, PRT 2023	100
Figura 3-10: Antigüedad Promedio de Camiones según Marcas más relevantes, PRT 2023	100
Figura 3-11: Cantidad de Tractocamiones según Marca, PRT 2023.....	101
Figura 3-12: Partición de Marcas Más Relevantes de Tractocamiones según Año de Fabricación, PRT 2023	102
Figura 3-13: Antigüedad Promedio de Tractocamiones según Marcas más relevantes, PRT 2023 ..	102
Figura 3-14: Totales de Ventas de Camiones y Tractocamiones entre los años 2014 y 2023	103
Figura 3-15: Total Ventas de Camiones y Tractocamiones entre los años 2014 y 2023 según Marca	103
Figura 3-16: Precios Referenciales Camiones Diesel.....	105
Figura 3-17: Autonomía de camiones de cero emisiones según peso del vehículo y alcance	110
Figura 3-18: Consumo de Hidrógeno según peso de vehículo, camiones FCEV	113
Figura 3-19: Evolución de Costos Totales para CAEX (En base a camión de 300 toneladas a cielo abierto)	114
Figura 3-20: Cantidad de estaciones de carga por región global	119
Figura 4-1: Etapas clave en la cadena de valor de H2V	120
Figura 4-2: Etapas clave en la cadena de valor de H2V para transporte	125
Figura 4-3: Barreras en el uso de hidrógeno en transporte.....	127
Figura 5-1: Antecedentes Principales a Presentar para Autorización Proyectos Especiales de Hidrógeno según SEC	137
Figura 5-2: Diagrama de Proceso de Autorización y Registro de Proyectos Especiales de Hidrógeno según SEC.....	138
Figura 5-3: Diagrama Resumido Proceso de Autorización y Registro de Proyectos Especiales de Hidrógeno según SEC	143

Figura 5-4: Proceso de Importación e Implementación Vehículos Pesados.....	146
Figura 5-5: Tipología de Buses de Transporte Público Decreto122/91 MTT.....	149
Figura 5-6: Principales elementos y sistemas tecnológicos buses estándar RED.....	150
Figura 5-7: Principales ámbitos que contempla la certificación de un bus urbano Sistema RED	157
Figura 5-8: Etapas del proceso de certificación	157
Figura 5-9: Proceso de importación e implementación de un vehículo pesado en Chile.....	163
Figura 6-1: Diagrama conceptual del proceso de análisis de caso	165
Figura 6-2: Diagrama de proceso de simulación de casos	167
Figura 6-3: Proyecciones del precio del diésel en distintas regiones.	171
Figura 6-4: Proyecciones del precio del Hidrógeno en el país.	172
Figura 6-5: Proyecciones del precio de los vehículos.	173
Figura 6-6: Crecimiento histórico poblacional a nivel Nacional y regional de Antofagasta y del Biobío. 175	
Figura 6-7: Tasas de crecimiento poblacional anual a nivel Nacional y regional de Antofagasta y del Biobío	176
Figura 6-8: Crecimiento histórico poblacional a nivel comunal en la Región de Antofagasta	177
Figura 6-9: Crecimiento histórico poblacional a nivel ciudad en la Región de Biobío y la ciudad de Chillán	178
Figura 6-10: Crecimiento histórico de Permisos de Circulación en las regiones de Antofagasta y del Biobío.	179
Figura 6-11: Evolución de la proporción del tipo de motorización en las regiones de Antofagasta y del Biobío.	180
Figura 6-12: Histograma año de fabricación por tipo de vehículo con revisión aprobada año 2024 en Región de Antofagasta.	183
Figura 6-13: Histograma del kilometraje al momento de la revisión por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la Región de Antofagasta.	183
Figura 6-14: Histograma del año de fabricación por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la región de Antofagasta.....	185
Figura 6-15: Histograma del kilometraje al momento de la revisión por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la región de Antofagasta.	185
Figura 6-16: Principales rutas Región de Antofagasta.	186
Figura 6-17: Principales rutas región del Biobío.	188
Figura 6-18: Ubicación estaciones de servicio que suministran bencina y diésel en la región de Antofagasta.	189
Figura 6-19: Ubicación estaciones de carga de vehículos eléctricos en la región de Antofagasta. ...	190
Figura 6-20: Ubicación estaciones de servicio que suministran bencina y diésel en la región del Biobío. 9	
Figura 6-21: Ubicación estaciones de carga de vehículos eléctricos en la región del Biobío.	192
Figura 6-22: Proporción del PIB regional de Antofagasta aportado por cada actividad económica en el año 2019, volumen a precios del año anterior encadenado.....	193

Figura 6-23: Proporción del PIB regional del Biobío aportado por cada actividad económica en el año 2019, volumen a precios del año anterior encadenado..	194
Figura 6-24: Diagrama de cuerpo libre: Fuerzas actuando en el vehículo.	196
Figura 6-25: Descomposición vectorial de la fuerza de gravedad.	197
Figura 6-26: Comparativa de fuerzas aplicadas en una rueda ideal y una real.	200
Figura 6-27: Modelo de un vehículo Diesel.	202
Figura 6-28: Modelo de un vehículo con celda de combustible.	203
Figura 6-29: Esquema de cálculo de ángulo de inclinación	206
Figura 6-30: Esquema de cálculo de la proyección de la velocidad del viento.	206
Figura 6-31: Fotografía del bus de referencia caso de estudio	209
Figura 6-32: Fotografías del vehículo y carga de referencia del Caso 1	211
Figura 6-33: Fotografía del bus a hidrógeno tipo.	212
Figura 6-34: Fotografía del camión a hidrógeno tipo.	214
Figura 6-35: Recorrido de la Ruta 1 de transporte de carga	216
Figura 6-36: Características del trayecto de la Ruta 1 de transporte de carga.	217
Figura 6-37: Recorrido de la Ruta 2 de transporte de carga	218
Figura 6-38: Características del trayecto de la Ruta 2 de transporte de carga.	218
Figura 6-39: Recorrido de la Ruta 3 de transporte de pasajeros.	219
Figura 6-40: Características del trayecto de la Ruta 3 de transporte de pasajeros.	220
Figura 6-41: Recorrido de la Ruta 4 de transporte de pasajeros.	221
Figura 6-42: Características del trayecto de la Ruta 4 de transporte de pasajeros.	221
Figura 6-43: Consumo de energía por ruta y tipo de vehículo	222
Figura 6-44: TCO por ruta y tipo de vehículo al año 2025 como inicio de operación	225
Figura 6-45: TCO por ruta y tipo de vehículo al año 2030 como inicio de operación	226
Figura 6-46: TCO por ruta y tipo de vehículo al año 2035 como inicio de operación	227
Figura 6-47: Evolución del ratio entre los TCO de los vehículos FCEV y los de los ICEV.	228
Figura 6-48: Variabilidad del rendimiento de los vehículos diésel en función de las condiciones meteorológicas.	229
Figura 6-49: Variabilidad del rendimiento de los vehículos con Fuel Cell en función de las condiciones meteorológicas.	230
Figura 6-50: Variabilidad del rendimiento energético de los vehículos Diesel.	231
Figura 6-51: Variabilidad del rendimiento energético de los vehículos con Fuel Cell.	231
Figura 6-52: Comparativa TCO Recorrido 1 en función de los costos de los energéticos y de inversión	232
Figura 6-53: Comparativa TCO Recorrido 2 en función de los costos de los energéticos y de inversión	233
Figura 6-54: Comparativa TCO Recorrido 3 en función de los costos de los energéticos y de inversión	233
Figura 6-55: Comparativa TCO Recorrido 4 en función de los costos de los energéticos y de inversión	234

Figura 6-56: Comparativa OPEX de la Ruta 1.	235
Figura 6-57: Comparativa OPEX de la Ruta 2.	235
Figura 6-58: Comparativa OPEX de la Ruta 3.	236
Figura 6-59: Comparativa OPEX de la Ruta 4.	236
Figura 6-60: Efecto del subsidio en la inversión en el TCO de camiones estudiados.	237
Figura 6-61: Efecto del subsidio en la inversión en el TCO de buses estudiados.	238
Figura 9-1: Perfil de Elevación Ruta 1 Tramo Norte (Media móvil de período 20).....	259
Figura 9-2: Perfil de Elevación Ruta 1 Tramo Sur (Media móvil de período 20).....	260
Figura 9-3: Perfil de Elevación Ruta 5 (Media móvil de período 10).	260
Figura 9-4: Perfil de Elevación Ruta 21 (Media móvil de período 10).	261
Figura 9-5: Perfil de Elevación Ruta 23 (Media móvil de período 10).	261
Figura 9-6: Perfil de Elevación Ruta 24.	262
Figura 9-7: Perfil de Elevación Ruta 25.	263
Figura 9-8: Perfil de Elevación Ruta 26 (Media móvil de período 3)	263
Figura 9-9: Perfil de Elevación Ruta 27 (Media móvil de período 10).	264
Figura 9-10: Perfil de Elevación Ruta 28 (Media móvil de período 5).	265
Figura 9-11: Perfil de Elevación Ruta N-14-O (Media móvil de período 15).....	266
Figura 9-12: Perfil de Elevación Ruta N-48-O (Media móvil de período 50).....	267
Figura 9-13: Perfil de Elevación Ruta N-59-Q (Media móvil de período 100).....	267
Figura 9-14: Perfil de Elevación Ruta P-20 (Media móvil de período 30).....	268
Figura 9-15: Perfil de Elevación Ruta P-40 (Media móvil de período 50).....	268
Figura 9-16: Perfil de Elevación Ruta P-60-R (Media móvil de período 50).	269
Figura 9-17: Perfil de Elevación Ruta P-72-S (Media móvil de período 60).	269
Figura 9-18: Perfil de Elevación Ruta Q-34 (Media móvil de período 40).	270
Figura 9-19: Perfil de Elevación Ruta Q-45 (Media móvil de período 30).	270
Figura 9-20: Perfil de Elevación Ruta Q-61 (Media móvil de período 60).	271
Figura 9-21: Perfil de Elevación Ruta Q-90 (Media móvil de período 15).	271
Figura 9-22: Perfil de Elevación Ruta Q-97-N (Media móvil de período 30).....	272
Figura 9-23: Perfil de Elevación Ruta 5 (Media móvil de período 20).	272
Figura 9-24: Perfil de Elevación Ruta 126-S (Media móvil de período 30).....	273
Figura 9-25: Perfil de Elevación Ruta 146 (Media móvil de período 50).	273
Figura 9-26: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 1.	274
Figura 9-27: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 2 (Media móvil de período 10).	274
Figura 9-28: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 3 al norte (Media móvil de período 10).....	275
Figura 9-29: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 3 al sur (Media móvil de período 10).....	275

Figura 9-30: Perfil de Elevación Ruta 152 (Media móvil de período 10).	276
Figura 9-31: Perfil de Elevación Ruta 154 (Media móvil de período 10).	276
Figura 9-32: Perfil de Elevación Ruta 156 (Media móvil de período 100).	277
Figura 9-33: Perfil de Elevación Ruta 158 (Media móvil de período 10).	277
Figura 9-34: Perfil de Elevación Ruta 160 (Media móvil de período 100).	278
Figura 9-35: Perfil de Elevación Ruta 177 (Media móvil de período 10).	278
Figura 9-36: Perfil de Elevación Ruta 178.	279
Figura 9-37: Perfil de Elevación Ruta 180 (Media móvil de período 20).	279

Nomenclatura

ANAC	Asociación Nacional Automotriz
BEV	Battery Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico con Batería
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DTPM	Directorio de Transporte Público Metropolitano
DTPR	Directorio de Transporte Público Regional
D.S	Decreto Supremo
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
FC	Fuel Cell - Pila de Combustible
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico con Pila de Combustible
FCEB	Fuel Cell Electric Bus – Bus Eléctrico con Pila de Combustible
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H2	Hidrógeno
HDT	High Duty Trucks – Camiones de carga pesada
HICEV	Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle – Vehículo con Motor de Combustión Interna de Hidrógeno
HRS	Hydrogen Refueling Station – Estación de carga de hidrógeno
ICE	Internal Combustion Engine – Motor de Combustión Interna
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle – Vehículos con Motor de Combustión Interna
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
LCE	Light Commercial Vehicles – Vehículos comerciales ligeros
MACI	Motor Alternativo de Combustión Interna
MDT	Medium Duty Trucks – Camiones de carga mediana
Minecon	Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción
MEN	Ministerio de Energía
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
MINMINERIA	Ministerio de Minería
MINSAL	Ministerio de Salud
MTT	Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones
MTPD	Metric Ton Per Day – Tonelada Métrica Por Día
PRT	Planta de Revisión Técnica
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
RNTP	Registro Nacional de Transporte Público
ROW	Resto of World – Resto del mundo

SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
TRL	Technology Readiness Level – Nivel de Madurez Tecnológica
TCO	Total Cost of Ownership – Costo total de propiedad
TCU	Total Cost of Use – Costo total de uso

1 Introducción

1.1 Contexto

La comunidad científica ha demostrado que la especie humana es responsable por prácticamente todo el calentamiento global de los últimos 200 años [1]. Actividades antropogénicas como el uso de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas. Los principales gases de efecto invernadero (GEI) incluyen el dióxido de carbono y el metano, los que pueden provenir del uso de gasolina en los vehículos o gas para calefacción de edificios. En ese sentido, los sectores de energía, industria, transporte, agricultura, edificaciones están entre aquellos que más producen GEI. Estos gases actúan como una especie de manta que envuelve al planeta, generando un efecto invernadero que provoca un incremento de la temperatura global de este. Dicho efecto invernadero es responsable de la actual crisis climática que está generando, sequías, escasez de agua potable, incendios forestales, aumento del nivel del mar, inundaciones, derretimiento del hielo polar, tormentas catastróficas y disminución de la biodiversidad.

Con el fin de enfrentar los efectos del cambio climático y evitar su avance, el sector energético está experimentando una profunda transformación para impulsar el cambio hacia tecnologías más limpias y fuentes de energía más sostenibles, reforzando a su vez la seguridad energética. Con esto, el interés por el hidrógeno de bajas emisiones ha crecido rápidamente debido a su versatilidad y alta densidad energética, tal como lo demuestra el hecho que múltiples países, entre ellos Chile [2] y la Unión Europea [3], hayan desarrollado estrategias y planes para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde.

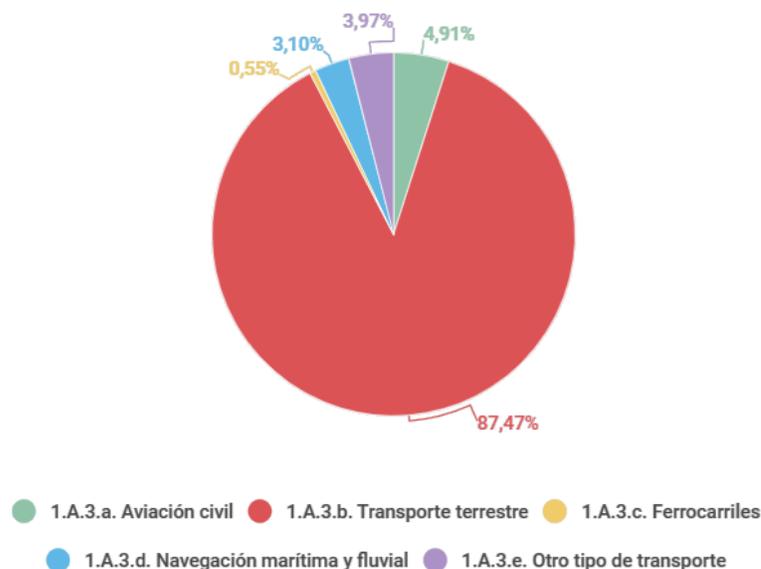


Figura 1-1: Distribución de Emisiones de GEI sector Transporte año 2020

Fuente: [4]

En Chile, ya en 2020, las emisiones de GEI del sector energía contabilizaron 79.724 kTn CO₂eq (75% de las emisiones totales del país), de las cuales el 98,9 % corresponden a la categoría “actividades de quema de combustible” [4]. El transporte es un subsector relevante dentro del sector energía, cuyas emisiones de GEI del provienen de la quema de combustibles fósiles necesarios para el funcionamiento de los distintos tipos de vehículos. En 2020 este sector era responsable de la emisión de 26.114 kTn CO₂eq anuales, correspondiente al

25% de las emisiones totales del país y al 33% de las emisiones del sector energía [4]. De estas, el transporte terrestre, aporta más del 87% de las emisiones de este sector.

En el marco de la lucha contra el cambio climático desde el sector energético, uno de los principales desafíos es el transporte por la atomización de sus actores y la dificultad de hacer renovable su consumo de energía. Distintas estrategias están siendo implementadas en distintos países y por distintos actores: desde el uso de biocombustibles de origen agrícola en vehículos existentes, hasta la incorporación de vehículos híbridos enchufables o 100% eléctricos, pasando por el uso de hidrógeno y combustibles derivados en distintas soluciones tecnológicas de tracción vehicular, sector en el que se enfoca el presente estudio.

Uno de los principales objetivos de la Agencia de Sostenibilidad Energética (AgenciaSE), es liderar y promover la construcción de una cultura sostenible en el tiempo. Entre los pilares para lograr este objetivo se encuentra la generación de estudios para la adquisición de conocimientos y posterior toma de decisiones con fundamentos sólidos. Es por esto por lo que, la AgenciaSE en conjunto con el Ministerio de Energía, en el marco de las acciones conjuntas para fortalecer las bases de estudios respecto al hidrógeno verde y sus posibles usos futuros han desarrollado la iniciativa “**Estudio para evaluar la viabilidad técnico-económica en la implementación de hidrógeno verde en el transporte pesado de carga y pasajeros**”.

1.2 Objetivos del Proyecto

El presente estudio tiene por objetivo general **evaluar la viabilidad técnico-económica en la implementación de hidrógeno verde en el transporte pesado de carga y pasajeros**.

Sus objetivos específicos son los siguientes:

- a) Analizar detalladamente la información sobre el transporte terrestre de vehículos pesados de carga y pasajeros en entornos urbanos y de carretera para identificar tendencias y necesidades.
- b) Documentar las tecnologías relacionadas con el transporte terrestre basado en hidrógeno verde, incluyendo infraestructuras de carga y sistemas auxiliares.
- c) Evaluar las implicancias económicas y documentar al menos 3 modelos de negocio para sistemas basados en hidrógeno verde, incorporando análisis de financiamiento público y privado y experiencias internacionales. Los modelos solo deben ser descritos y se deben respaldar con un diagrama de flujo o esquema simplificador.
- d) Organizar y analizar datos económicos relacionados con la transición al hidrógeno verde, considerando costos de producción, infraestructura de carga, mantenimiento y costos operativos a largo plazo.
- e) Analizar la normativa y legislación aplicable a los vehículos de transporte pesado de carga por carretera, y buses pasajeros en entornos urbanos o interurbanos, así como a las tecnologías asociadas.
- f) Proponer descriptivamente una comparación de al menos 3 modelos de negocio, para el transporte de pasajeros y carga en las regiones de Antofagasta y Biobío. Los modelos solo deben ser descritos y se deben respaldar con un diagrama de flujo o esquema simplificador.
- g) Elaborar recomendaciones y conclusiones sobre la viabilidad técnica, de eficiencia y financiera para implementar el transporte de pasajeros y carga basado en hidrógeno verde en las dos regiones hub seleccionadas de Chile.

1.3 Alcance

El presente informe corresponde al entregable final del “**Estudio para evaluar la viabilidad técnico-económica en la implementación de hidrógeno verde en el transporte pesado de carga y pasajeros**”

Esta entrega contiene los resultados de todas las actividades requeridas del estudio, las que se presentan en los diferentes capítulos del informe:

1. **Capítulo 2:** Contempla el levantamiento del estado del arte del hidrógeno verde aplicado en el transporte pesado de carga y pasajeros. En este capítulo se incluye:
 - a. Una descripción de las características técnicas de la tecnología de hidrógeno aplicada al transporte (celda de combustible, tanque de hidrógeno, sistema de potencia y almacenamiento de energía, motor eléctrico, entre otros).
 - b. El contexto nacional e internacional de la utilización de hidrógeno verde en el transporte pesado de carga por carretera y de pasajeros urbano, interurbano, graficando experiencias y casos de uso de varios países y regiones como Estados Unidos, China y Europa.
2. **Capítulo 3:** Se presenta un levantamiento de los antecedentes de fabricantes y proveedores. Así como una descripción del parque de buses y camiones actual en operación en el país. En particular se describen:
 - a. Buses de transporte de pasajeros (urbano e interurbanos)
 - i. Valores de buses convencionales y a hidrógeno
 - ii. Características técnicas de los buses
 - iii. Lugar de fabricación
 - b. Camiones de transporte de carga.
 - i. Valores de camiones de transporte de carga convencionales y a hidrógeno
 - ii. Características técnicas de los camiones de transporte de carga
 - iii. Lugar de fabricación los
 - c. Sistemas de carga de hidrógeno para buses de transporte de pasajeros (carretera e interurbanos) y de camiones de transporte de carga.
 - i. Valores de los sistemas de carga.
 - ii. Características técnicas de los sistemas de carga.
 - iii. Ubicaciones del lugar de fabricación o ensamblaje.
3. **Capítulo 4:** Se desarrolla un análisis de brechas a nivel nacional y se identifican las barreras de entrada al país, en donde se describen las dificultades de importación, de infraestructura, financieras, económicas, institucionales, normativas, sociales, ambientales, de capital humano, entre otras a tener en cuenta para el desarrollo de las tecnologías a hidrógeno de vehículos de carga y de pasajeros en el país.
4. **Capítulo 5:** Se trabaja en un análisis de las problemáticas a nivel normativo que se pueden generar en la implementación de las tecnologías a hidrógeno en el país, donde se ahonda en:
 - a. Procedimiento y tiempos de demora en los siguientes procesos:
 - i. Homologación
 - ii. Primera inscripción
 - iii. Inscripción Seremi transporte
 - iv. Capacitación personal
 - b. Normativa aplicada al sistema de carga.
 - c. Normativa aplicada a camiones y buses a hidrógeno.
 - d. Necesidades del proyecto para la obtención de permisos.
5. **Capítulo 6:** Se desarrolla un análisis de casos de aplicación comparativos entre vehículos convencionales a combustible diésel y vehículos a hidrógeno en las regiones de Antofagasta y Biobío. El análisis incluye:
 - a. Análisis comparativo de consumo de energía e implementación a partir del sistema de hidrógeno entre:
 - i. Buses de transporte de pasajeros urbanos o interurbanos en las 2 regiones

- ii. Camiones de transporte de carga en las 2 regiones
 - b. Análisis de sensibilidad para cada caso analizado (transporte de pasajeros y de carga) que incluye las siguientes variables:
 - iii. Análisis de energía requerida en cada tramo del recorrido.
 - iv. Autonomía del bus y camión v/s Extensión de recorrido (km).
 - v. Costos de inversión y operación de los vehículos seleccionados.
- 6. **Capítulo 7:** Desarrollo de conclusiones y recomendaciones sobre la implementación de los casos estudiados de transporte de pasajeros (urbano o interurbanos) y camiones de transporte de carga con rutas establecidas actualmente para efectuar dicho transporte de carga, basadas en la evaluación técnica, de eficiencia y valores económicos estudiados y en base a la comparación de ambas propuestas.

2 Levantamiento Estado del Arte del H2V Aplicado en el Transporte de Carga y Pasajeros

2.1 Planteamiento

En el sector transporte, el hidrógeno de bajas (o nulas) emisiones puede jugar un papel importante en la descarbonización de las operaciones del subsector de transporte pesado, cuya descarbonización es particularmente difícil de abordar, dados sus requerimientos de alta autonomía y potencia.

Para comprender la potencial importancia del uso del hidrógeno en el transporte, hay que tomar en cuenta las características de las distintas alternativas de descarbonización presentes y futuras. De forma general dichas alternativas se pueden agrupar en, biocombustibles, e-combustibles, hidrógeno y electromovilidad, las cuales se describen a continuación:

- a) **Biocombustibles.** Los biocombustibles, como el bioetanol, el biodiésel y el biogás, son derivados de la biomasa, sea agrícola, forestal o residual. Estos combustibles, que se pueden usar en motores de combustión convencionales sin apenas modificaciones, tienen ya un largo recorrido y se han desarrollado no solo por consideraciones ambientales, sino también a raíz de la búsqueda de fuentes alternativas por parte de países con menos acceso a combustibles fósiles. A pesar de ser la solución más extendida hoy, el impacto ambiental, el consumo de agua y la competencia por el uso de la tierra frente a cultivos para alimentación humana, son impedimentos importantes para que representen una solución sistémica a largo plazo. Además, hay que considerar las emisiones de CO₂ locales, aun siendo neutras en carbono al provenir de cultivos que hayan capturado previamente el CO₂, y el posible impacto en el medio asociado a la captura de dicho CO₂.
- b) **e-combustibles.** Los e-combustibles o combustibles sintéticos, son hidrocarburos sintetizados mediante procesos químicos a partir de hidrógeno verde y CO₂ capturado de la atmósfera o de origen biogénico. A diferencia de los biocombustibles no requieren de fuentes orgánicas, cultivadas o aprovechadas, dado que su contenido energético proviene del hidrógeno, aunque el resultado de su combustión es el mismo: emisión de CO₂ local y neutro a nivel global por su captura previa. La motivación de su existencia responde al hecho que son más fáciles de manejar que el hidrógeno puro, tiene una mayor densidad energética y se pueden utilizar en motores diseñados para combustibles fósiles con mínimas modificaciones.
- c) **Hidrógeno** El hidrógeno es un vector energético artificial, que no existe de forma natural en el medio ambiente, y que se puede producir a partir de otros combustibles (como el reformado de hidrocarburos o la gasificación del carbón) o disociando el agua mediante procesos biológicos o de aporte directo de energía, ya sea térmica, eléctrica o radiación solar directa. Cuando el proceso de producción no requiere de uso de combustibles fósiles, se considera hidrógeno verde o renovable, H2V, pero el hidrógeno más común sigue siendo el denominado gris, producido a partir de hidrocarburos. Independientemente de su origen, su transformación en calor, electricidad o energía mecánica ya sea por combustión o por procesos electroquímicos, no genera CO₂, sino vapor de agua y, para procesos de alta temperatura, NO_x. Por lo tanto, el uso de H2V no emite CO₂ ni local ni globalmente y no tiene ningún impacto en el medio ambiente, más allá de las plantas de generación renovable, lo que supone una ventaja respecto a los biocombustibles y los e-combustibles. Sus hándicaps operativos respecto a éstos están asociados a su manejo, por ser un gas muy inflamable que requiere de infraestructuras específicas no existentes, y al hecho de no poder usarse en motores de combustión interna convencionales modificados. A efectos de costos de explotación, el hándicap del H2V es que el costo del hidrógeno generado a partir de electricidad

renovable siempre será más caro que la propia electricidad renovable, la cual para el caso de vehículos eléctricos con batería (BEVs), se usa directamente en la tracción.

- d) **Electromovilidad.** La electromovilidad, con un vertiginoso desarrollo de los BEVs en los últimos años, es la tecnología central de descarbonización del transporte. Usa la electricidad de forma directa para la tracción de los vehículos mediante el uso de motores eléctricos, con rendimientos de transformación muy elevados en comparación con el resto de las tecnologías, lo que le permite costos de explotación más bajos que los sistemas basados en hidrógeno. Aun así, en el sector del transporte pesado de personas y mercancías, especialmente cuando se requieren autonomías importantes o usos intensivos, la limitada autonomía de las baterías actuales y el alto tiempo de recarga lastran su potencial impacto.



*) Technology Readiness Level of truck  ≤5  6-7  8-9 Legend:  low level  high level
 1) Tank-to-Wheel 2) Low carbon fuels (e.g. CNG, LNG), liquid biofuels 3) Sustainable e-fuels from renewable sources

Figura 2-1: Comparativa de tecnologías de propulsión alternativas para camiones pesados

Fuente: [5]

Tomando en consideración lo expuesto anteriormente, es plausible considerar que los biocombustibles pueden jugar un rol transitorio hacia una movilidad descarbonizada, pero que en el futuro deberían limitarse a aplicaciones concretas en entornos específicos asociados al recurso residual o forestal. Por su parte, los e-combustibles, a pesar de sus emisiones locales de CO₂, podrían ocupar espacios en los que la electromovilidad o el hidrógeno no tengan tan buen desempeño y/o problemas de manejo, como en la aviación, algunos tipos de transporte marítimo u otros casos singulares, dado que, difícilmente, podrán competir energética y económicamente con el uso directo de hidrógeno, por la menor eficiencia energética intrínseca de éstos al ser productos de síntesis basados en éste. Finalmente, la electromovilidad y el hidrógeno, deberían ser las soluciones

masivas de movilidad, considerando que, usando electricidad de origen renovable en los dos casos, garantizarían un modelo con cero emisiones tanto locales como globales sin impacto en el sector agroalimentario y con un impacto ambiental acotado a los sistemas de generación renovable. Se considera que el reparto de usos y mercados entre ambas familias de soluciones vendrá dado por variables de tipo económico y comercial. En lo económico, el costo efectivo de uso de cada uno de los vectores estará condicionado por sus costos de fabricación y sus características técnicas específicas, como el rendimiento energético, la autonomía efectiva o los tiempos de recarga, pero también por el nivel de desarrollo de las infraestructuras específicas, tanto de distribución del energético como, especialmente, de estaciones de recarga. Por otro lado, en lo comercial y/o de aceptación social de cada una de las tecnologías, de nuevo jugarán un papel destacado prestaciones como la autonomía, la disponibilidad de puntos de recarga y los tiempos asociados, pero también la percepción de la sociedad respecto a la renovabilidad de la propuesta, su futuro desarrollo y la peligrosidad de su uso.

Bajo esta lógica se desarrolla el presente trabajo, en el que las tecnologías identificadas y trabajadas tienen como foco principal el desarrollo a largo plazo de soluciones de movilidad de cero emisiones basadas en el uso directo del hidrógeno, tanto FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico con Pila de Combustible) como HICEV (Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle – Vehículo con Motor de Combustión Interna de Hidrógeno). Estas tecnologías deberán competir en el mercado con la electromovilidad basada en baterías y, en paralelo, con soluciones más específicas y de transición, asociadas al uso de e-combustibles principalmente en ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle – Vehículos con Motor de Combustión Interna).

2.2 El Hidrógeno y Combustibles Derivados

2.2.1 Introducción

El uso del hidrógeno puro presenta desafíos logísticos en términos de su almacenamiento y distribución, y su uso en ICEs (Internal Combustion Engine – Motor de Combustión Interna) está todavía en desarrollo, lo que ha dado lugar a la aparición de procesos para sintetizar combustibles derivados del H₂ con mejores características de manejo y almacenamiento, a la vez que más compatibles con las tecnologías de ICE existentes en el mercado.

A continuación, se resumen sus características y nivel de adopción tecnológica:

- **Metanol:** es un alcohol producido a partir de hidrógeno y CO₂, que se presenta como una opción versátil debido a su capacidad para ser utilizado en motores de combustión interna adaptados y su potencial para ser producido a gran escala además de presentar una mayor densidad energética¹ que el hidrógeno puro. La tecnología para producir metanol a partir de hidrógeno verde y CO₂ está bien establecida, y su uso en motores de combustión interna está avanzado. En general, el metanol como combustible para transporte pesado se encuentra en TRL (Technology Readiness Level) de entre 8 y 9 [6], con proyectos y estudios desarrollados en China como principal impulsor de la tecnología.
- **Amoniaco:** es un gas producido mediante el proceso de Haber (reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseosos para producir amoníaco) correspondiente a otro derivado del hidrógeno que ha sido considerado para el transporte pesado, sin embargo, es el que representa el mayor nivel de toxicidad para los seres humanos, por lo que su desarrollo para esta industria es menor. En transporte pesado, el TRL del amoníaco como combustible está entre 4 y 5 [7], siendo mayor para el transporte marítimo. Un

¹ La **densidad energética** es la cantidad de **energía** que puede almacenarse en un sistema, sustancia o región de espacio. La densidad energética puede medirse en **energía por volumen** o por **masa**. Cuanto mayor sea la densidad de energía de un sistema o material, mayor será la cantidad de energía que tiene almacenada. [106]

ejemplo de esto es el proyecto AMON [8] en Francia, el que ha desarrollado estudios del uso de este derivado tanto en transporte pesado como en el transporte marítimo.

- **Diésel sintético:** es obtenido mediante el proceso Fischer-Tropsch, a partir de hidrógeno (H₂V para que sea considerado un e-combustible) y CO₂, también puede ser viable debido a su alta densidad energética y compatibilidad con motores diésel existentes. El diésel sintético, aunque tecnológicamente maduro, sigue enfrentando el desafío de los altos costos de producción cuando se utiliza hidrógeno verde como materia prima. Sin embargo, es completamente compatible con los motores diésel existentes debido a que es químicamente idéntico al diésel convencional, lo que hace que tenga una adopción tecnológica muy alta. Esto significa que su viabilidad de adopción a gran escala es también alta, ya que puede ser utilizado en la infraestructura de transporte pesado ya establecida sin necesidad de modificaciones significativa. Por esto, el TRL del diésel sintético está entre 8 y 9 [6]. Una demostración de esto es la iniciativa de AUDI de desarrollar tecnología para la producción y suministro de e-diésel para su uso en motores convencionales [9].
- **Metano sintético:** es producido a través de la metanización del hidrógeno² (H₂V para que sea considerado un e-combustible) con CO₂, es otro combustible prometedor, especialmente para vehículos a gas o en configuraciones dual-fuel, ya que comparte muchas de las características del gas natural, pero con emisiones de carbono reducidas o cero. El metano sintético se encuentra en un estado de desarrollo moderado, tanto en términos de tecnología como de infraestructura. Si bien la metanización utilizando hidrógeno verde está siendo investigada, su producción a gran escala aún enfrenta barreras económicas. Sin embargo, el metano sintético tiene la ventaja de poder integrarse en la infraestructura de gas natural existente, lo que facilita su adopción. El metano sintético se encuentra en nivel de adopción de entre 6 a 8, como demuestra el proyecto del 2017 Power to Gas, en Alemania.
- **Dimetil éter (DME):** es derivado del metanol, también ofrece una combustión más limpia y es adecuado para motores adaptados, sin embargo, presenta una baja densidad energética en comparación con los otros derivados además de una baja compatibilidad con la infraestructura existente. El DME se encuentra en TRL de 6 a 8 para transporte pesado y de 7 a 8 [10], [11] para transporte marítimo, con varios estudios en China que van por esta vía [11]

Para el alcance y foco del presente estudio, tomando en cuenta las características de cada uno de los e-combustibles, se **considera únicamente el uso del hidrógeno puro, el metanol y diésel sintético.**

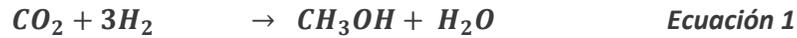
2.2.2 Metanol

El proceso de producción del metanol a partir del hidrógeno verde es un proceso industrial sustentable que utiliza hidrógeno (producido por electrólisis del agua usando energía renovable) y dióxido de carbono (CO₂) capturado. Se ilustra en la Figura 2-2 y consta de las siguientes fases:

1. **Electrólisis del agua:** Las moléculas de agua (H₂O) se descomponen en moléculas de hidrógeno y oxígeno mediante una corriente eléctrica continua. De este proceso, se obtiene el hidrógeno que seguirá el proceso de producción.
2. **Captura de CO₂:** Mediante un proceso de CCS (Carbon Capture and Storage) se captura el CO₂ directamente de los gases de escape de procesos de combustión en instalaciones industriales, así como mediante captura directa de aire (DAC, por sus siglas en inglés). El CO₂ capturado es purificado para ser usado como reactivo en la siguiente etapa.

² Combinación de CO₂ con H₂ para producir CH₄

3. **Síntesis de Metanol:** El dióxido de carbono se combina con el Hidrógeno en un reactor químico bajo condiciones específicas de temperatura (200-300 °C y presión 50-100 atm). Como catalizadores generalmente se utilizan mezclas de cobre, zinc y aluminio para facilitar la conversión eficiente.



4. **Purificación del metanol:** Después de la reacción de síntesis, el metanol crudo se separa del agua, así como de otros subproductos mediante destilación. El metanol puro se almacena para su distribución y uso posterior.

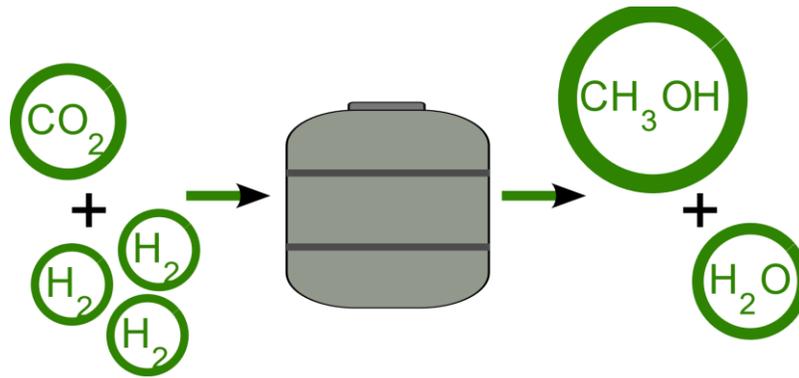


Figura 2-2: Producción de metanol

Fuente: Elaboración propia

El proceso se considera carbono neutral siempre y cuando el CO₂ haya sido capturado y el Hidrógeno se haya producido mediante energías renovables.

Los motores alternativos a metanol consideran pequeños cambios en relación a los motores tradicionales a diésel, ya que el metanol es un alcohol simple con propiedades diferentes a los combustibles fósiles tradicionales, lo que requiere de considerar modificaciones en los motores.

Un ejemplo interesante de producción de metanol a partir de hidrógeno es el que realiza la empresa Carbon Recycling International (CRI) en Islandia, quienes producen Metanol renovable también llamado "Vulcanol" utilizando hidrógeno verde y CO₂ capturado directamente de la alta actividad volcánica presente en el país. Incluso, la propia energía del volcán es utilizada para la reacción química de síntesis de metanol. Actualmente, la empresa produce más de 200.000 toneladas de Metanol al año con instalaciones a escala comercial [12] y posee un convenio con Geely (Volvo) para la fabricación de vehículos híbridos que utilicen este Metanol en conjunto con uso de gasolina, debido a su dificultad de encendido.

De acuerdo al reporte [13] se espera que para el año 2050, el 30% de la demanda de combustible en Europa sea en base a combustibles alternativos como el metanol, en donde su principal uso es visto para vehículos livianos, sin embargo, también observa usos relevantes a futuro en vehículos de transporte pesados.

En relación a la posibilidad de utilizar metanol como combustible, este presenta las siguientes **ventajas** [14]:

- Dado que el metanol es un líquido cuando está a temperatura ambiente, su almacenamiento y transporte se realiza utilizando infraestructura existente o adaptada, simplificando la logística de estos procesos.
- Puede ser utilizado en motores de combustión interna adaptados para usar metanol, lo que facilita una transición menos disruptiva en comparación con otros combustibles alternativos. Estas adaptaciones incluyen principalmente una modificación del sistema de inyección de combustible y cambio de materiales en los cilindros, para hacer frente a la naturaleza levemente más corrosiva del metanol.
- Es menos inflamable que el hidrógeno y presenta un menor riesgo de explosión, lo que mejora la seguridad en su manejo.

Por otro lado, su utilización presenta las siguientes **desventajas**:

- Aunque es compatible con infraestructura existente en términos de almacenamiento y transporte, aún se requieren inversiones significativas a nivel de producción, debido principalmente a los sistemas de captura de CO₂, y estaciones de carga de metanol verde a gran escala [13].
- Aunque las emisiones de CO₂ son muy bajas, los motores de combustión interna que usan metanol todavía generan óxidos de nitrógeno (NO_x), lo que requiere sistemas adicionales de control de emisiones.
- El metanol es tóxico si se ingiere o se inhala en grandes cantidades, lo que requiere precauciones adicionales en su manejo y transporte. [14]

Finalmente, la siguiente tabla muestra el grado de desarrollo tecnológico (TRL) de las diferentes etapas requeridas para la producción del e-metanol.

Tabla 2-1: TRL actuales de tecnologías requeridas para el desarrollo del e-metanol

Tecnología	TRL actual
Electrólisis alcalina de agua	9
Extracción de CO ₂ mediante gases industriales	9
Extracción de CO ₂ del aire	6
Síntesis de Hidrógeno	9
Síntesis de Metanol	9

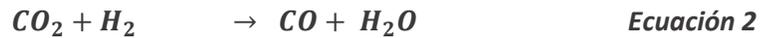
Fuente: [13]

2.2.3 Diésel Sintético

El e-diésel (o diésel sintético) es un combustible líquido, hidrocarburo, que es producido usando el proceso de electrólisis del hidrógeno. El proceso de producción del e-diésel puede describirse en los siguientes pasos y se ilustra en la Figura 2-3:

1. **Electrólisis del agua:** Las moléculas de agua (H₂O) se descomponen en moléculas de hidrógeno y oxígeno mediante una corriente eléctrica continua. De este proceso, se obtiene el hidrógeno que seguirá el proceso de producción
2. **Captura de CO₂:** Mediante un proceso de CCS (Carbon Capture and Storage) se captura el CO₂ directamente de los gases de escape de procesos de combustión en instalaciones industriales.

3. **Producción de Syngas³**: El dióxido de carbono se combina con el Hidrógeno produciendo un syngas.



4. **Proceso de Fischer-Tropsch**: A partir de estas materias primas se procede al proceso de Fischer-Tropsch (FT) el cual corresponde a un proceso químico que convierte el syngas en un hidrocarburo líquido, en este caso a un combustible sintético (diésel). Se ilustra en la

El proceso corresponde a una conversión catalítica en un reactor FT, en donde el syngas pasa sobre un catalizador (generalmente hierro o cobalto) a temperaturas entre 150 y 300 °C y presiones moderadas (10-40 bar) para que el monóxido de carbono y el hidrógeno reaccionen formando cadenas de hidrocarburos, agua y otros subproductos.



5. **Refinación**: El producto generado en el proceso de FT, que consiste en una mezcla de hidrocarburos líquidos y gases, se separa descartando los productos indeseados y se ajustan las propiedades del hidrocarburo líquido resultante (como la viscosidad y el punto de congelación) para cumplir con los estándares requeridos para que el e-diésel obtenido pueda ser considerado como un combustible sustituto del diésel regular, esto es cumplir con la norma EN 15940 y la EN 590.

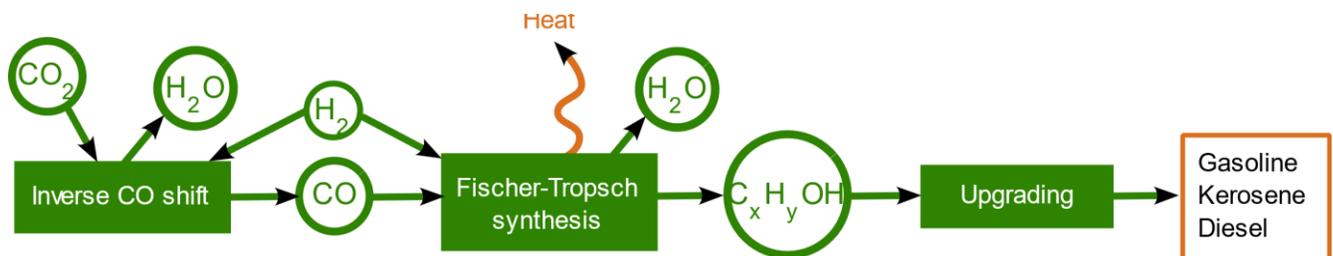


Figura 2-3: Producción de e-diésel vía Proceso Fischer-Tropsch

Fuente: Elaboración propia

El uso de hidrógeno puro asegura una conversión eficiente, ya que proporciona el ambiente ideal para formar hidrocarburos líquidos. Y, además, termina transformándose en un método interesante cuando el hidrógeno utilizado como materia prima es verde (proveniente de energías renovables) y el dióxido de carbono se captura de manera sustentable, haciendo que el proceso completo sea neutro en carbono.

Las **ventajas** del diésel sintético podrían resumirse en:

- Se puede utilizar directamente en motores diésel existentes, sin necesidad de modificaciones. Esto incluye camiones, buses de transporte de pasajeros e incluso maquinaria pesada. Por lo tanto, no requiere de nuevas infraestructuras ni cambios en los vehículos o maquinarias.

³ El syngas o gas de síntesis es un combustible gaseoso obtenido a partir de sustancias ricas en carbono a alta temperatura compuesto por una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno

⁴ n indica el número de moles de carbono implicados en la reacción de síntesis, condicionando el número de carbonos que tendrá el hidrocarburo lineal saturado (alcano) sintetizado. Si n=1 se obtendrá metano, si n=2 etano o si n=3 propano.

- Es libre de azufre y otros compuestos nocivos presentes en el diésel fósil, lo que mejora la calidad del aire y además mejora la eficiencia de combustión en los motores. Además, requieren menos sistemas de postratamiento de emisiones.
- Permite un rendimiento energético similar al diésel fósil, siendo ideal para aplicaciones donde se requiere alta eficiencia. La densidad energética del diésel tradicional es de aproximadamente 35,8 MJ/litro, mientras el diésel sintético alcanza densidades energéticas entre 35 y 36 MJ/litro.
- Mejora el encendido, reduce el ruido del motor e incrementa la eficiencia del motor en condiciones de carga variable, esto debido a que posee un número de Cetano mayor al del diésel tradicional. Este número mide la facilidad con la que el combustible se enciende bajo compresión, afectando la suavidad y eficiencia del motor. El diésel tradicional posee un número de Cetano entre 40 y 55, mientras el diésel sintético puede alcanzar valores de 70 a 80, según el diseño.

Las **desventajas** del diésel sintético se centran principalmente en su producción:

- Posee un mayor costo de producción y que es difícil de competir con el diésel fósil que al estar basado en petróleo crudo, se aprovecha de las infraestructuras de fabricación consolidadas y de las economías de escala. Se estima que el precio final podría fluctuar entre 2 a 4 veces que el diésel tradicional (Neomotor, 2023).
- El proceso completo de producción del hidrógeno, además de la captura de CO₂ y la síntesis Fischer-Tropsch tiene una eficiencia menor al del diésel tradicional. Solo 30-50% de la energía inicial de las fuentes renovables se convierte en energía utilizable en el diésel sintético [13]. Esto implica que se requiere generar más electricidad renovable para producir el mismo volumen de e-diésel.
- Para que el e-diésel sea neutro en carbono requiere de capturar CO₂ en procesos industriales o mediante captura directa del aire, lo que aumenta aún más los costos de producción e incluso puede llegar a limitar su disponibilidad, requiriendo infraestructura específica para este fin.
- El e-diésel podría enfrentar desafíos regulatorios en los mercados, en donde se tengan que incorporar a los combustibles sintéticos.

La siguiente tabla muestra a su vez el grado de desarrollo tecnológico (TRL) de las diferentes etapas requeridas para la producción del diésel sintético.

Tabla 2-2: TRL actuales de tecnologías requeridas para el desarrollo del e-diésel

Tecnología	TRL actual
Electrólisis alcalina de agua	9
Extracción de CO ₂ mediante gases industriales	9
Extracción de CO ₂ del aire	6
Síntesis de hidrógeno	9
Síntesis de Fischer-Tropsch	9

Fuente: [13]

El diésel sintético puede ser usado tanto como combustible individual, así como mezclado con otros combustibles convencionales. Y para ser compatibles con los vehículos actuales el diésel sintético tiene cumplir con los estándares de combustibles existentes actuales como son el EN228 o EN590 de acuerdo a la normativa europea.

2.2.4 Conclusiones

En la Tabla 2-3 se muestra un resumen de las propiedades fisicoquímicas de los tres combustibles seleccionados para los análisis recogidos en este trabajo: **hidrógeno puro, metanol y diésel sintético**.

Tal como se puede observar, la densidad energética del hidrógeno dista mucho de la de los combustibles derivados de éste (1 a 3 con el metanol y 1 a 6 con el diésel) lo que impacta directamente en la autonomía de los vehículos, aun a pesar de la diferencia de rendimiento entre los sistemas de transformación y tracción asociados (ICEV versus FCEV) que, como se expone más adelante, es favorable a los sistemas eléctricos con pila de combustible, pero no suficiente para revertir esta diferencia de densidad energética.

Los combustibles derivados tienen además la ventaja de no requerir nuevas infraestructuras, ser menos explosivos que el hidrógeno y requerir adaptaciones tecnológicas mínimas, en el caso del metanol, o nulas en el caso del diésel, para su uso en motores ICE convencionales.

Aun así, el uso directo del hidrógeno en FCEV genera cero emisiones locales de CO₂, NO_x y SO_x, y su costo energético y económico será siempre menor, por ser la materia prima principal tanto del e-Metanol como del e-Diésel.

Tabla 2-3: *Propiedades de los diferentes combustibles basados en hidrógeno*

Propiedades de Combustibles	e-Metanol	Hidrógeno puro	e-Diésel
Densidad (kg/m ³)	793	0,084 (50 a 700bar)	780
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	20,09	120	44
Densidad de energía volumétrica (MJ/L)	15,87	9,6 x 10 ⁻³ (6 a 700bar)	34,3
Temperatura adiabática de llama (K)	2143	2390	2200
Calor de vaporización (kJ/kg)	1100	461	225-280
Ratio aire-combustible estequiométrico (kg/kg)	6,5	34,2	14,7
Límite flamabilidad (vol%)	6,7-36	4-75	0,6-6,5
Temperatura de autoencendido (K)	738	858	483-503
Velocidad de combustión laminar (m/s)	0,37	3,51	n.a.
Número de octanaje Investigación/Motor	109/92	130/n.a.	53
Número de Cetano	3	n.a.	>51

Fuente: [13]; [14]

2.3 Tecnologías de Movilidad Asociadas al Uso de Hidrógeno

2.3.1 Introducción

En base a la información recopilada y analizada hasta este punto, se considera que las tecnologías de movilidad a tomar en consideración y a caracterizar en el marco del presente trabajo son los Vehículos Eléctricos con Pila de Combustible (FCEV) y los Vehículos con Motores de Combustión Interna (ICEV) alimentados con hidrógeno o combustibles sintéticos derivados de éste.

La coexistencia de estas dos tecnologías para el uso de un mismo combustible para el mismo uso responde a un proceso de desarrollo del mercado desde ópticas e intereses distintos, cada una con sus ventajas y desventajas y sus especificidades que podrían condicionar su despliegue y su rol en un mercado futuro más consolidado.

Desde el punto de la eficiencia energética los FCEV destacan manifiestamente sobre los ICEV, dado que con rendimientos de la FC del 60% y de entre el 90% y 95% del motor eléctrico, el rendimiento equivalente se sitúa alrededor del 55%, mientras que los ICEV difícilmente superarán el 35%. Además, los FCEV tienen la capacidad de recuperación de energía de frenado mediante su sistema de baterías eléctricas, mientras que los ICEV sólo pueden lograrlo en modelos híbridos con motores eléctricos.



Figura 2-4: Comparativa rendimientos ICE vs FCEV

Fuente: Elaboración propia

En lo ambiental, los ICEV alimentados con e-combustibles generan emisiones locales de CO₂, NO_x y SO_x, y sólo de NO_x cuando usan hidrógeno puro, debido a las altas temperaturas de combustión, mientras que los FCEV no emiten más que vapor de agua.

Sin embargo, tal como se ha expuesto 2.2.2y 2.2.3 los ICEV alimentados con e-combustibles utilizan tecnologías muy extendida y validadas a nivel mundial, mientras que los FCEV son sistemas mucho más novedosos y complejos. Por otra parte, aun cuando el uso de H₂ en ICE presenta todavía sus desafíos técnicos, en el momento que la tecnología se consolide, podría presentar ventajas de tipo económico y ambiental, por el menor costo del hidrógeno y sus bajas emisiones locales.

A continuación, se presenta una descripción técnica de cada una de estas dos soluciones.

2.3.2 Vehículos Eléctricos con Pila de Combustible (FCEV)

2.3.2.1 Introducción

Se considera un vehículo eléctrico con pila de combustible (FCEV, por sus siglas en inglés) a un medio de transporte que utilice un motor eléctrico alimentado principalmente por una pila de combustible como elementos de conversión energética.

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de un combustible directamente en electricidad, generando calor residual y vapor de agua como único residuo. Este proceso tiene lugar mediante una reacción de oxidación-reducción del combustible, típicamente hidrógeno, con el oxígeno. Para más información ver el punto 2.4.1 Pilas de Combustible.

2.3.2.2 Descripción Funcional

De manera similar a los vehículos eléctricos de batería (BEV), los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) utilizan un motor eléctrico alimentado por la electricidad para la tracción del vehículo. En los FCEV, dicha electricidad se produce mediante la pila de combustible alimentada con hidrógeno o, alternativamente, metanol, en lugar de extraer electricidad únicamente de una batería como los BEV. Sin embargo, los FCEV también disponen de baterías para almacenar la energía recuperada en el frenado y proporcionar energía adicional cuando es necesario, como en aceleraciones fuertes. Estas baterías también tienen la misión de lograr una entrega de energía más suave desde la pila de combustible, permitiendo incluso que ésta pase a inactividad o se apague en momentos de baja necesidad energética. Esta funcionalidad se ilustra en la Figura 2-5 que se muestra a continuación.

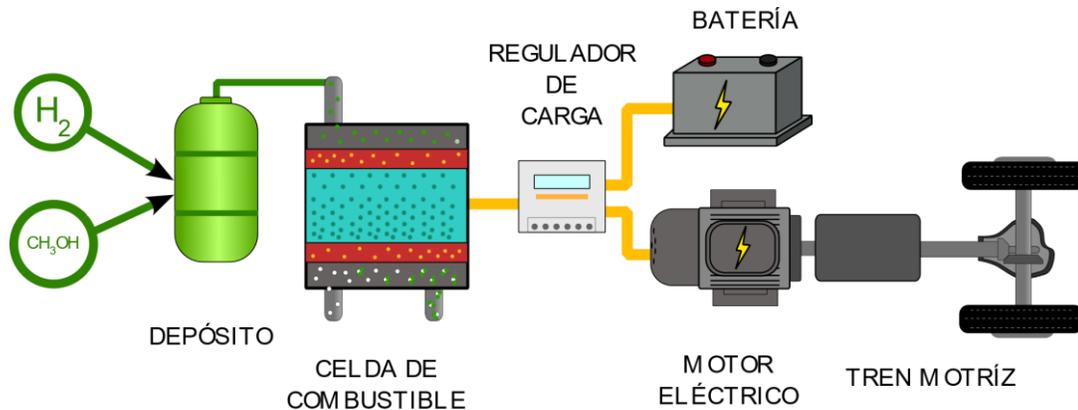


Figura 2-5: Componentes principales de un Vehículo Eléctrico con Pila de Combustible alimentado con metanol o con hidrógeno (FCEV)

Fuente: Elaboración propia

Los componentes clave de un FCEV de hidrógeno son:

1. **Llenador de combustible:** al igual que en un vehículo con motor de combustión interna, permite llenar el tanque de combustible (en los FCEV es un tanque de hidrógeno). Es una boquilla de un dispensador de combustible que se conecta al receptáculo del vehículo para llenar el tanque.
2. **Tanque de hidrógeno:** al igual que en un vehículo con motor de combustión interna, es el tanque de combustible de un FCEV y almacena gas hidrógeno a bordo del vehículo hasta que lo necesite la pila de combustible.
3. **Sistema de suministro de combustible:** responsable de suministrar de forma segura hidrógeno a la pila de combustible desde el tanque de hidrógeno de alta presión (la presión en el tanque varía según las necesidades operacionales de la aplicación, llegando a 700 bar, mientras que la presión de suministro es de aproximadamente 2 bar).
4. **Sistema de suministro de aire:** suministra oxígeno atmosférico al FCEV y protege la pila de combustible de contaminantes.
5. **Sistema de gestión térmica/enfriamiento:** como la celda de combustible produce calor en exceso, este sistema lo rechaza como el radiador de un vehículo con motor de combustión interna y controla la temperatura de la pila de combustible.
6. **Pila de combustible:** el corazón de un FCEV que convierte el hidrógeno en electricidad a través de las reacciones electroquímicas entre el hidrógeno almacenado y el oxígeno atmosférico y alimenta el vehículo.
7. **Baterías de tracción:** almacenan el exceso de energía generada por la pila de combustible y el frenado regenerativo y proporciona energía suplementaria al motor de tracción eléctrica.
8. **Controlador de electrónica de potencia:** administra el flujo de corriente eléctrica entregado por la pila de combustible y la batería de tracción, así como también controla la velocidad y el torque del motor de tracción eléctrico.
9. **Motor eléctrico:** al igual que los vehículos eléctricos a batería, este motor impulsa las ruedas del vehículo, pero utiliza la energía de la pila de combustible y de la batería de tracción a bordo cuando es necesario.
10. **Transmisión:** a diferencia de la transmisión de un vehículo con motor de combustión interna, convierte la energía eléctrica en energía mecánica a través del motor de tracción eléctrica y hace funcionar los vehículos.

Además de la pila de combustible, el sistema de propulsión de una pila de combustible tiene cuatro subsistemas para hidrógeno, oxígeno, refrigerante y componentes de alto voltaje.

Estos subsistemas son:

- a) El **subsistema de suministro de combustible** transporta hidrógeno al lado del ánodo de la pila desde un tanque de hidrógeno de alta presión. Un soplador de recirculación del ánodo dentro del sistema de suministro de combustible promueve la circulación de hidrógeno en la ruta del ánodo.
- b) El **subsistema de suministro de aire para oxígeno** incluye un filtro de aire, un compresor de aire y humidificadores para transportar oxígeno limpio al lado del cátodo de la pila. El aire se extrae directamente de la atmósfera y luego pasa a través del filtro de aire para eliminar partículas y otras materias no deseadas. Unos humidificadores garantizan la humedad relativa del aire suministrado
- c) El **subsistema de gestión térmica y de agua** con circuitos separados de agua y refrigerante elimina el calor residual y el agua de producto. Parte del calor residual se puede recircular hacia la cabina del vehículo durante los días de invierno, mejorando la eficiencia general del vehículo. El sistema de gestión térmica y del agua también controla la temperatura de funcionamiento de la pila de combustible, así como las temperaturas del motor eléctrico, la electrónica de potencia y otros componentes del vehículo.
- d) En el subsistema eléctrico, un controlador y la electrónica de potencia vehicular la electricidad generada por la pila hasta el motor eléctrico, que transmite potencia a las ruedas del vehículo. El exceso de electricidad de la pila se almacena en la batería eléctrica para proporcionar energía complementaria al eje de transmisión cuando sea necesario.

2.3.2.3 Aplicación de las FC para transporte pesado

2.3.2.3.1 Introducción

Tal como se puede entender, no todas las tecnologías de pilas de combustible son adecuadas u óptimas para el transporte en general y para el transporte pesado concretamente. Son de interés las tecnologías con altas eficiencias eléctricas, independiente de su capacidad de recuperación de calor, con costos contenidos y dinámicas de arranque y servicio suficientemente rápidas. Pero, en cualquier caso, todas las tecnologías de FC comparten unas características que las hacen interesantes frente al uso de baterías eléctricas, que son su capacidad para ofrecer mayores autonomías y recargas mucho más rápidas que las ideales para aplicaciones en transporte colectivo de pasajeros y camiones de carga tanto ligera como pesada.

En este sentido, las ventajas son razones de peso y con proyección en el tiempo:

1. Las FC combinadas con motores eléctricos, tienen mejor rendimiento que los motores de combustión de hidrógeno, por las limitaciones termodinámicas del ciclo de Carnot.
2. Esta solución presenta también ventajas respecto a los BEVs por la mayor densidad energética del hidrógeno y la mayor velocidad de carga, aspectos que redundan en una mayor autonomía y una mayor practicidad y aceptación social.
3. Respecto a motores alimentados por hidrocarburos, presenta la ventaja de la nula emisión de cualquier tipo de contaminante local y, si se utiliza H₂V, es totalmente inocua a nivel global.

Por otro lado, las desventajas son eminentemente de tipo coyuntural y se debiesen resolver con el desarrollo de una economía del hidrógeno. Estas son:

1. Se requiere una infraestructura específica de distribución y servicio de H₂ costosa y actualmente inexistente en la mayoría de los países y regiones del mundo.
2. Costo del H₂V todavía demasiado elevado frente a electricidad y biocombustibles

Los desarrollos de vehículos pesados con FC utilizan principalmente dos tecnologías de pilas de combustibles:

- **PEMFC:** Comúnmente utilizadas en transporte público y camiones debido a su eficiencia en operación continua.
- **SOFC:** Más adecuadas para transporte pesado, largas distancias y entornos industriales. Permiten el uso de combustibles alternativos como amoníaco o metanol.

Tabla 2-4: Características de tipos de pilas de combustibles más utilizadas en transporte de carga y pasajeros

Tipo	Aplicación Principal	Ventajas	Desafíos
PEMFC	Buses y camiones ligeros	Alta eficiencia, recarga rápida	Costo de materiales (platino)
SOFC	Camiones pesados, minería	Uso flexible de combustibles	Alta temperatura de operación

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.3.2 Aplicaciones en transporte de pasajeros

Tal como se expone en el punto 2.5 Contexto Internacional, los buses equipados con FC alimentadas por H₂, son una de las aplicaciones más extendidas, con miles de casos en todo el mundo, aunque especialmente localizados en China, Europa y Estados Unidos. En todos estos, el desarrollo se debe a una clara apuesta gubernamental y a la aportación de fondos públicos para viabilizar los servicios.

Por otra parte, viendo lo identificado en el punto 3.1 Buses de Transporte de Pasajeros, puede considerarse que este sector está tecnológicamente habilitado para su desarrollo, dado que existen modelos comerciales de autobuses y miles de ellos operando.

En el sector del transporte de pasajeros, las ventajas competitivas de los buses con FC sobre los buses tipo BEV son importantes:

1. **Autonomía.** Con autonomías de hasta 600 km esta tecnología es apta para servicios interurbanos de media distancia y permite minimizar el número de ciclos de carga en transporte urbano.
2. **Tiempos de recarga.** La posibilidad de recargar el 100% del tanque de combustible en menos de 20 minutos, aporta también, comparativamente a los BEVs, a optimizar la explotación de los servicios regulares.
3. **Climas Fríos.** A diferencia de las baterías eléctricas, las FC son poco sensibles a las bajas temperaturas, no afectando a su capacidad de carga ni de desarrollo de potencia.

Si diferenciamos los servicios entre urbanos e interurbanos, podemos caracterizar las aplicaciones con algo más de detalle:

Tabla 2-5: Generalidades de servicios y características técnicas para líneas de buses

	Buses Urbanos	Buses Interurbanos
Aplicaciones	Líneas urbanas cíclicas y continuas	Líneas interurbanas y servicios discrecionales de mediana distancia
Autonomía requerida	200-300km al día	400-600km
Tecnologías principales	PEMFC con almacenamiento a 350 o 700 bar	PEMFC con almacenamiento a 350 o 700 bar
Ventajas	Operación silenciosa, cero emisiones locales y tiempos de repostaje rápidos	Tiempos de recarga más rápidos y mayor autonomía. Menores tiempos de inactividad gracias a repostajes rápidos y menor impacto ambiental comparado con buses diésel.

	Buses Urbanos	Buses Interurbanos
Desventajas	Requerimiento de infraestructura específica y costosa de recarga	Requerimiento de infraestructura específica y costosa de recarga
Ejemplo comercial	Los buses de hidrógeno de Ballard Power Systems y Solaris están en operación en ciudades europeas como Londres y Hamburgo	Buses de hidrógeno desarrollados por Hyundai y Toyota para rutas interurbanas en Asia y Europa

Fuente: Elaboración propia con datos de distintos capítulos del presente informe

2.3.2.3.3 Aplicaciones en transporte de carga

En transporte de carga hay que diferenciar camiones ligeros para recorridos cortos o urbanos, camiones para media distancia y camiones pesados para largos recorridos. Además, se tiene a los camiones especiales, como aquellos que se usan en las faenas mineras.

Se describen a continuación cada uno de los segmentos según aplicaciones, requerimientos de los servicios, tecnologías, ventajas competitivas y ejemplos.

Tabla 2-6: Generalidades de servicios y características técnicas para tipos de camiones

	Camiones de Cortas Distancias	Camiones de Medias Distancias	Camiones de Larga Distancia
Aplicaciones	Entregas urbanas y rutas fijas en zonas suburbanas.	Servicios Interurbanos	Transporte de Carga Pesada
Autonomía requerida	150-300km	300-500km	800-1200km
Tecnologías principales	Pilas de combustible PEMFC	PEMFC con tanques de hidrógeno comprimido a 700 bar que permiten mayor eficiencia	PEMFC con almacenamiento avanzado de hidrógeno líquido (LH ₂) o sistemas a 700 bar.
Ventajas	Cero emisiones locales y capacidad de operar en áreas de bajas emisiones. Tiempos de recarga más rápidos y mayor autonomía que camiones tipo BEV	Cero emisiones locales y capacidad de circular por áreas de bajas emisiones. Tiempos de recarga más rápidos y mayor autonomía que camiones tipo BEV	Ideal para rutas de gran alcance sin la necesidad de recargas frecuentes, optimizando tiempos de operación
Desventajas	Mayores costos de inversión y explotación que camiones tipo BEV y requerimiento de infraestructura específica y costosa de recarga	Mayores costos de inversión y explotación que camiones tipo BEV y requerimiento de infraestructura específica y costosa de recarga, pero diseñadas ad-hoc para flotas interurbanas, con alto nivel de utilización	Requerimiento de infraestructura específica y costosa de recarga, debido a las necesidades de almacenamiento y refrigeración del hidrógeno líquido
Ejemplo comercial	Toyota Kenworth con PEMFC	Nikola Tre de Clase 8	Nikola y Bosch están desarrollando camiones para este segmento con capacidades superiores a los 80 kg de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia con datos de distintos capítulos del presente informe

En base a los datos recabados y considerando las fuentes consultadas⁵ se considera que, en general, para las distancias cortas son más adecuados y competitivos los camiones tipo BEV, siendo el ámbito óptimo de aplicación para los camiones con FC las largas distancias. Lo anterior se explica porque la ventaja competitiva de los FCEV sobre los BEV es la autonomía y velocidad de recarga, que a menudo no son necesarias en aplicaciones urbanas

Tabla 2-7: Ejemplos de camiones FC comerciales

Modelo	Autonomía (km)	Carga Máxima (Tn)	Región Principal
Nikola Tre	800	40	Estados Unidos
Hyundai XCIENT	600	36	Europa
Toyota Kenworth	480	36	California

Fuente: Elaboración propia con datos de distintos capítulos del presente informe

2.3.2.3.4 Resumen integrado sobre las pilas de combustible

Tanto para transporte de pasajeros como de carga, se observa que las ventajas competitivas del uso de FC sobre los BEVs se encuentran en la autonomía, la velocidad de recarga y las bajas temperaturas. Pero por su parte, los BEVs son más competitivos por el menor costo de la electricidad y la facilidad y economía de establecer puntos de recarga. Por lo anterior y tomando en consideración también otras fuentes, cabe apuntar que la competitividad de las FC de H₂ en transporte pesado es mayor en aplicaciones interurbanas y de larga distancia que en aplicaciones urbanas.

Por otro lado, es capital tener presente que el desarrollo de estos servicios mediante el despliegue de flotas, debe ir acompañado de una planificación de infraestructuras de recarga ad-hoc y que ésta dependerá de la modalidad del transporte, no solo por ubicación, sino también por tecnología de acumulación y recarga.

En la tabla siguiente se presentan los distintos servicios de transporte descritos anteriormente con sus principales características y requerimientos.

Tabla 2-8: Comparativa de tipos de vehículos de transporte de carga y pasajeros con sus principales características

Tipo de Vehículo	Distancia	Tecnología principal	Autonomía (km)	Tiempos de recarga aproximados	Infraestructura
Camión urbano	Corta	PEMFC (350 bar)	150-300	10-20 min	Hidrogeneras urbanas
Camión interurbano	Mediana	PEMFC (700 bar)	300-500	20 min	Infraestructura regional
Camión larga distancia	Larga	PEMFC + LH ₂ /700 bar	800-1200	30 min	Infraestructura avanzada
Bus urbano	Corta	PEMFC (350-700 bar)	200-300	10-15 min	Hidrogeneras públicas
Bus interurbano	Mediana	PEMFC (700 bar)	400-600	20 min	Infraestructura regional

Fuente: Elaboración propia con datos de distintos capítulos del presente informe

⁵ [3] [5] [44]

2.3.3 Vehículos con Motores de Combustión Interna (ICEV)

2.3.3.1 Introducción

Se considera un vehículo con motor de combustión interna (ICEV, por sus siglas en inglés) a un medio de transporte que utilice un motor de combustión interna (ICE, por sus siglas en inglés) como elemento de conversión energética.

Un motor de combustión interna es una máquina térmica capaz de transformar la energía química de un combustible en energía mecánica a través del proceso de combustión, el cual se desarrolla al interior del motor, lo que le da su nombre distintivo. Los motores de combustión interna han sido el pilar de la industria automotriz y del transporte desde su invención en 1876 y en la actualidad se utilizan tan ampliamente que la mayoría de los vehículos terrestres poseen esta tecnología.

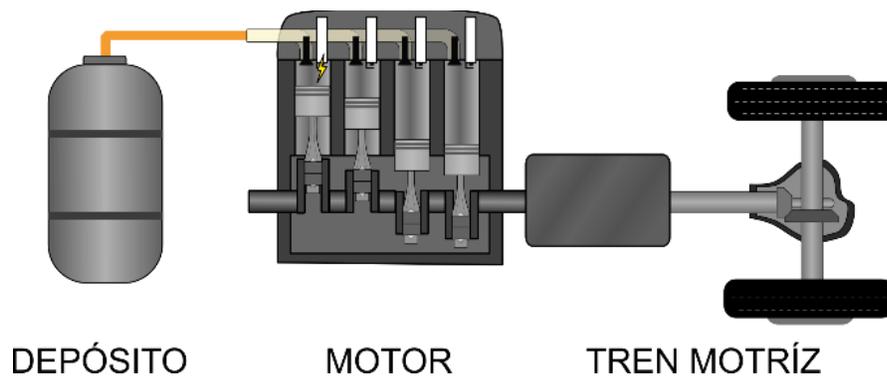


Figura 2-6: Componentes principales de un vehículo con motor de combustión interna (ICEV)

Fuente: Elaboración Propia

El principio básico de funcionamiento de un motor de combustión interna es aprovechar la expansión de gases calientes generados por la combustión de un combustible para mover un pistón dentro de un cilindro. Esta energía se transfiere a través de un sistema mecánico para generar movimiento, que puede propulsar vehículos o accionar maquinaria. Este principio de funcionamiento permite que trabajen con una amplia variedad de combustibles, como gasolina, diésel, gas natural y, más recientemente, hidrógeno.

Los motores de combustión interna pueden clasificarse según el ciclo termodinámico en el que basan su funcionamiento. En este apartado, los principales tipos de motores son los motores Otto y los motores Diésel.

Los motores Otto basan su funcionamiento en el ciclo termodinámico Otto, en el cual el combustible requiere de un elemento que inicie la combustión, el cual es generalmente una bujía que produce una chispa de alto voltaje en un momento determinado, lo que inicia el proceso. Por otro lado, el motor Diésel no requiere de un activador para combustionar, ya que el proceso se logra a través de la autocombustión por compresión del combustible. Esta diferencia hace los combustibles sean compatibles con un solo tipo de motor dependiendo de las propiedades fisicoquímicas del energético.

2.3.3.2 Descripción Funcional

Los vehículos que incluyen esta tecnología cuentan con distintos componentes que actúan conjuntamente para lograr funcionar adecuadamente. Por un lado, se tiene un depósito o estanque en donde se almacena el combustible, conectado a él se encuentra el motor, encargado de generar la energía para movilizar el vehículo y por último se encuentra el tren motriz, el cual se encarga de transformar y controlar la energía del motor para

efectuar el movimiento del vehículo. Estos componentes se presentan esquemáticamente en la Figura 2-6 y se describen a continuación:

2.3.3.2.1 Depósito

El depósito corresponde a un contenedor que posee las características físicas y químicas para almacenar y transportar el combustible del vehículo, así como disponer de un puerto que permita la extracción continua y controlada del mismo.

2.3.3.2.2 Motor

El motor es el componente que transforma la energía química disponible en el combustible en energía mecánica. Su funcionamiento depende del tipo de combustible utilizado.

Cuando la composición del combustible hace que sea fácilmente mezclable con el aire, se utiliza un motor Otto. Este tipo de motor cuenta con un sistema de inyección que introduce la mezcla de aire-combustible al interior de un cilindro para posteriormente comprimirla y hacerla explotar con la chispa de una bujía. Esta explosión empuja un pistón, el cual, a través de una biela, hace rotar el cigüeñal que impulsa el tren motriz.

Por su parte, cuando el combustible no se mezcla adecuadamente con el aire, como en el caso del Diésel, los inyectores ingresan únicamente aire a la cámara de combustión, el cual se comprime y alcanza una alta temperatura y presión. En este punto se inyecta el combustible, el que, debido a las condiciones térmicas, inicia una autoignición por compresión. Esta explosión, al igual que en el motor Otto, impulsa un pistón que mueve el cigüeñal del vehículo.

2.3.3.2.3 Tren motriz

El tren motriz es el mecanismo encargado transformar la rotación del eje del motor en un movimiento de translación del vehículo. El tren motriz está compuesto por la transmisión que se encarga de recibir y administrar la potencia del motor. En paralelo, los vehículos cuentan con un sistema de frenos que, aplicando fricción, permiten regular la rotación de las ruedas. La acción de los frenos libera energía en forma de calor, la cual no es aprovechable para ningún proceso del vehículo.

2.3.3.2.4 Elementos auxiliares

Los ICEV requieren de otros diversos componentes para su utilización efectiva y segura, estos elementos son luces, sensores, motores eléctricos, entre otros. Dichos componentes requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, por lo que estos vehículos incorporan una batería, la cual se encarga de alimentar los elementos auxiliares. Para mantener la batería cargada cuentan con un alternador, el cual toma parte de la potencia del motor para generar esa energía necesaria.

2.3.3.3 Combustibles

Los combustibles basados en hidrógeno que pueden utilizarse en vehículos de transporte pesado tipo ICE corresponden a todos aquellos que reúnan características como un rango de inflamabilidad alto, la posibilidad de controlar el quemado del combustible para evitar una detonación, una alta tasa de liberación de calor, debe presentarse en un estado físico manejable, no debe reaccionar químicamente con los materiales con los cuales el motor está construido, entre otros atributos.

Existen varios combustibles basados en hidrógeno, con distintos niveles de desarrollo y de adopción tecnológica, que reúnen estas características, en mayor o menor medida. El hidrógeno puro destaca por la posibilidad de su uso directo en motores adaptados por lo que su uso no requiere de una transición tecnológica total. Otros combustibles basados en hidrógeno que incluso pueden utilizarse de forma directa en motores de combustión interna sin necesidad de adaptación son el diésel o el metano sintéticos, sin embargo, en estos casos el hidrógeno

gaseoso presenta algunas ventajas competitivas como una densidad energética mayor por unidad de masa (pero no por unidad de volumen). Esta última característica es de importancia particular en el transporte pesado pues si bien el hidrógeno requiere de más espacio que los combustibles líquidos sintéticos, requiere de menos masa que éstos, por lo que no agrega un peso extra al vehículo.

De todas formas, el diésel y metano sintéticos siguen siendo combustibles derivados del hidrógeno verde viables de utilizar en estos motores. El metanol y el dimetil-éter también corresponden a combustibles viables de utilizar en estos vehículos, con facilidad de manejo y de transporte también.

Finalmente, el amoníaco se presenta también como un combustible sin carbono en su composición y factible de utilizar en este tipo de vehículos. Este combustible en particular es más complejo de manejar debido a su mayor toxicidad, y a pesar de que su combustión no libera emisiones de carbono sí emite sustancias tipo NO_x, también dañinas para el medioambiente. Sin embargo, su uso en estas aplicaciones continúa siendo estudiado, pues presenta una alta densidad energética.

2.3.3.4 Características Principales

Los vehículos con motores de combustión interna han sido una de las innovaciones más significativas en el desarrollo del transporte moderno. Sus usos abarcan desde el transporte personal, como automóviles y motocicletas, hasta aplicaciones comerciales, como camiones, autobuses y maquinaria pesada.

Estos vehículos poseen un amplio rango de velocidades, llegando a superar los 400 km/h en los modelos deportivos de alto rendimiento [15].

Los principales beneficios de los ICEV incluyen su capacidad para proporcionar una potencia inmediata y su autonomía, ya que no dependen de una red eléctrica como los vehículos eléctricos. Sin embargo, presentan desventajas, como su impacto ambiental, ya que emiten dióxido de carbono y otros contaminantes al quemar combustibles fósiles. A pesar de los avances tecnológicos que buscan reducir estas emisiones, los vehículos con motores de combustión interna siguen siendo responsables de una parte significativa de la contaminación global [16].

En comparación con los vehículos eléctricos, los ICEV tienen un costo inicial generalmente más bajo y una mayor autonomía. Por otro lado, suelen tener mayores costos operativos.

2.4 Características Técnicas de las Tecnologías

A continuación, se describen y caracterizan las tecnologías relacionadas al uso de hidrógeno verde y sus derivados en el sector de transporte pesado.

2.4.1 Pilas de Combustible

2.4.1.1 Generalidades

Las pilas de combustible (FC⁶) son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de un combustible directamente en electricidad, generando calor residual y vapor de agua como único residuo. Este proceso tiene lugar mediante una reacción de oxidación-reducción del combustible, típicamente hidrógeno, con el oxígeno.

El proceso es de alta eficiencia y mínimo impacto ambiental, dado que la obtención de energía en las FC está exenta de cualquier proceso térmico o mecánico intermedio, alcanzando eficiencias de entre el 40% y el 60%,

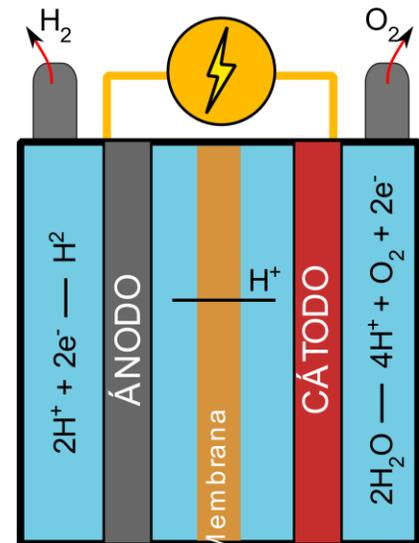
⁶ Aunque en inglés se usa la misma palabra para una celda de combustible que para un conjunto operativo de ellas, en castellano celda se refiere a una unidad y pila a dicho conjunto operativo. Aun así, se usa la abreviación FC para referir-se a una Pila de Combustible formada por Celdas de Combustible.

notablemente mayores que las máquinas térmicas (limitadas por la eficiencia del Ciclo de Carnot). Esta eficiencia puede llegar hasta el 90% si consideramos la recuperación de calor.

De forma general, las celdas de combustible constan de dos electrodos: el ánodo (donde se oxida el combustible) y el cátodo (donde se reduce el oxidante). El electrolito actúa simultáneamente como aislante eléctrico, conductor protónico y separador de las reacciones que tienen lugar en el cátodo respecto a las que tienen lugar en el ánodo. Debido a lo anterior, los electrones viajan desde el ánodo hasta el cátodo a través de un circuito externo, generando una corriente eléctrica, mientras que los protones lo hacen a través del electrolito.

En resumen:

- Ánodo:** dónde se introduce el combustible para su oxidación, liberando protones y electrones
- Electrolito:** medio o membrana que, permitiendo el paso de los protones, impide el paso de los electrones, haciendo que éstos deban circular por un circuito en el que se induce la corriente eléctrica
- Cátodo:** dónde los protones y los electrones se combinan con el aire para generar agua
- Catalizador:** responsable de la aceleración de las reacciones electroquímicas en ánodo y cátodo



El proceso electroquímico se puede resumir también como:

- Oxidación del combustible en el ánodo
- Transporte de carga eléctrica del ánodo al cátodo
 - Protones a través del electrolito
 - Electrones a través de un circuito eléctrico
- Reducción del oxígeno en el cátodo, recombinando electrones y protones, para formar agua

Las pilas de combustible se pueden clasificar en función del electrolito y del combustible elegido, lo que a su vez determina el tipo de reacciones que se llevarán a cabo en los electrodos y los tipos de iones que la corriente transportará a través del electrolito. Hoy en día, la mayoría de las células de combustible en desarrollo utilizan hidrógeno o gases sintéticos ricos en hidrógeno

2.4.1.2 Tipos de Pilas de Combustible

Hoy en día existen muchos tipos de pilas de combustible con distintas características, enfoques y niveles de desarrollo, pero no todas ellas son aptas para su uso en transporte, ámbito en el que dominan las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), aunque también se encuentran otras tecnologías como las de ácido fosfórico (PAFC) o más recientemente las alcalinas (AFC).

En la tabla siguiente se presentan las principales características y aplicaciones de las tecnologías más comunes.

Tabla 2-9: Resumen de características principales de tipos de pilas de combustibles

Tipo	Electrolito	Catalizador	Temp. de Operación (°C)	Potencia	Eficiencia Eléctrica(%)	Usos Principales	Ventajas	Inconvenientes
PEMFC	polímero sólido	Platino	50-200	0,1-100 kW	40-60 (pila)	Vehículos de transporte (más común)	Temperatura de operación baja	Coste del catalizador
					30-50 (sistema)	Aplicaciones estacionarias	Arranque rápido	Sensibilidad a las impurezas

Tipo	Electrolito	Catalizador	Temp. de Operación (°C)	Potencia	Eficiencia Eléctrica(%)	Usos Principales	Ventajas	Inconvenientes
						(residencial y comercial)		del combustible
						Telecomunicaciones		
DMFC	polímero sólido	Platino	50-120	1mW-100kW	20-30 (pila)	Aplicaciones de pequeño tamaño (teléfonos móviles, ordenadores portátiles, etc)	Facilidad de transporte del metanol	Baja eficiencia
					10-20 (sistema)		Alta densidad de potencia del metanol	
AFC	solución de hidróxido de potasio en agua	metales no preciosos	105-245	(10-100)kW	60-70 (pila)	Aplicaciones espaciales	Rendimiento alto	Sensible al CO2 del aire
					62 (sistema)	Aplicaciones militares	Bajo coste de los componentes	
						Vehículos de transporte (menos extendido)		
PAFC	Ácido fosfórico líquido	platino sobre base de carbono	180-205	>10MW	55 (pila)	Aplicaciones estacionarias (residencial y comercial)	Alta tolerancia a las impurezas	Coste del catalizador
					36-42 (sistema)	Vehículos de transporte (más reciente)		Arranque lento
								Baja densidad de potencia
MCFC	carbonatos alcalinos sobre una matriz cerámica	material de los electrodos (no platino)	650	100W	50-60 (pila)	Aplicaciones estacionarias (residencial y comercial)	Alta eficiencia	Corrosión debida a las altas temperaturas
					47 (sistema)	cogeneración	Admite gran variedad de combustibles y de catalizadores	Arranque lento
								Baja densidad de potencia
SOFC	sólido cerámico	material de los electrodos (no platino)	800-1000	>100kW	60-65 (pila)	Aplicaciones estacionarias (comercial e industrial)	Alta eficiencia	Corrosión debida a las altas temperaturas
					50-60 (sistema)	Cogeneración	Admite gran variedad de combustibles y de catalizadores	Arranque lento
						Vehículos de transporte (trenes)		

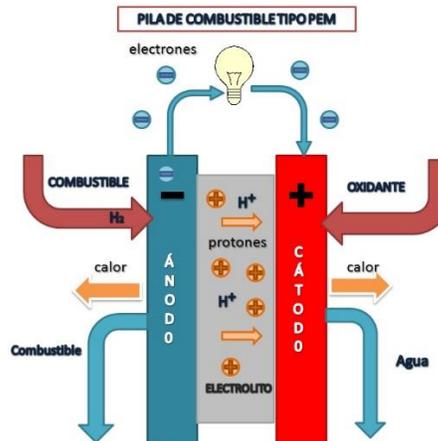
Fuente: [17]

2.4.1.3 Pilas de Combustible para transporte

Se describe a continuación cada una de las tecnologías aptas para el transporte [17].

2.4.1.3.1 Pila de Combustible de Membrana de intercambio protónico (PEM)

- **Electrolito:** membrana de polímero sólido
- **Catalizador:** platino.
- **Temperatura de operación:** dentro del rango de 50° a 200°C
- **Eficiencia eléctrica:** 40-60%



Las principales funciones de las PEM son separar los gases reactivos del ánodo y el cátodo, garantizar la conductividad protónica del ánodo al cátodo y proporcionar aislamiento eléctrico entre ambos electrodos. Por estas razones, el material debe ser impermeable a los gases, eléctricamente aislante y poseer alta conductividad iónica. Además, las membranas deben tener suficiente resistencia mecánica y ser química y térmicamente estables dentro de sus rangos de operación. El material de vanguardia para aplicaciones automotrices es el ácido perfluorosulfónico (PFSA). Este material cuenta con una cadena principal perfluorada hidrofóbica que proporciona soporte mecánico y estabilidad química, y grupos terminales de ácido sulfónico hidrofílicos que facilitan la absorción de agua para la conducción de protones. La longitud de estas cadenas laterales influye en la estabilidad y el rendimiento del electrolito. Las membranas de cadena larga y de cadena corta se diferencian principalmente en el número de unidades CF_2 . [18].

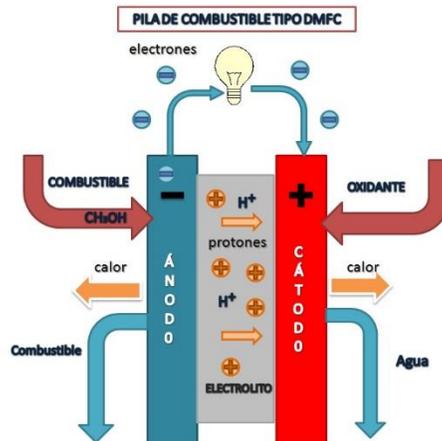
Las PEM tienen una alta densidad de potencia y pueden variar rápidamente su potencia de salida para adaptarse a la demanda energética. Una característica relevante, además, es que tienen un amplio rango de temperaturas de trabajo (50°-200°C) pudiendo alcanzar incluso potencias de hasta 5 MW [19]. Las PEMs pueden utilizar como combustible hidrógeno, metanol o combustibles reformados.

Los sistemas de pilas de combustible tipo PEM son adecuados para aplicaciones que requieran una respuesta de funcionamiento rápida. Así, se utilizan en una amplia variedad de sistemas que se centran en el mercado de las telecomunicaciones (tanto a nivel industrial como casero) y en vehículos para el transporte de materiales, como los montacargas. También pueden ser utilizadas en buses de pasajeros, con la posibilidad de la entrada de 20 modelos distintos [20] de buses a hidrógeno con pilas de combustible tipo PEM en el mercado global a fines de 2024.

Los principales retos actuales en el desarrollo de este tipo de pilas son: disminuir el coste y aumentar la eficiencia (lo que se traduce en reducir el espesor de la capa catalítica de platino y optimizar la dispersión del catalizador); mejorar las prestaciones de la membrana polimérica (aumentar la conductividad iónica y capacidad de retención de agua); y encontrar un material alternativo al grafito para la placa bipolar que sea de alta conductividad eléctrica y térmica, resistente a la corrosión, más ligero y económico.

2.4.1.3.2 Pila de combustible de Metanol (DMFC)

- **Electrolito:** membrana de polímero sólido.
- **Catalizador:** Platino.
- **Temperatura de operación:** alrededor de los 50-120 °C.
- **Eficiencia eléctrica:** por encima del 40%.

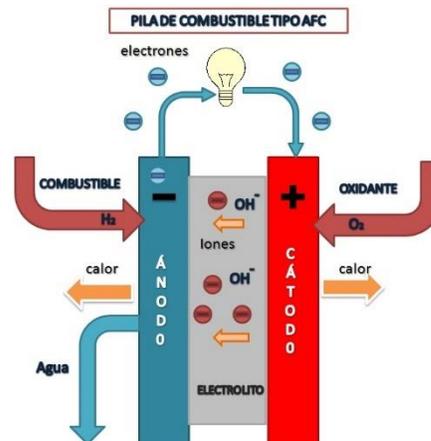


Al igual que las PEMs, las DMFC utilizan como electrolito una membrana de polímero. Sin embargo, en los sistemas DMFC no es necesario que el combustible pase por un reformador, ya que el propio ánodo catalizador extrae el hidrógeno del metanol líquido. Dado que la temperatura mínima de operación de este tipo de pilas es baja, las DMFC se pueden utilizar en aplicaciones de pequeño tamaño, como teléfonos móviles (ver figura de la izquierda), computadores portátiles y cargadores de baterías para otros productos electrónicos.

En este tipo de pilas, el desafío radica en identificar una membrana que evite problemas de "crossover" (el paso del reactante anódico al compartimiento catódico a través de la membrana) y en encontrar un catalizador anódico más eficiente para la oxidación directa de metanol. Ambos fenómenos pueden superarse o reducirse con la utilización de nuevos materiales para las membranas. Se han investigado membranas compuestas de PVA-difenilamina-4-ácido sulfónico sódico, que pueden reducir el *crossover* de metanol. También se han propuesto membranas sulfonadas de polietersulfona con *nanosheets*⁷ de disulfuro de tungsteno, lo que aumenta la resistencia al metanol. [21]

2.4.1.3.3 Celdas de Combustible Alcalinas (AFC) [22] [23]

- **Electrolito:** una solución de hidróxido de potasio en agua.
- **Catalizador:** se pueden usar una gran variedad de metales tanto preciosos como no preciosos.
- **Temperatura de operación:**
 - Baja temperatura: 23°C a 70°C
 - Alta temperatura: 100 a 250°C
- **Eficiencia eléctrica:** 60% a 70%



⁷ Nanoestructura bidimensional con un espesor de entre 1 a 10 nm.

Las pilas de combustible alcalinas se caracterizan por su alta eficiencia eléctrica, que hizo que fueran seleccionadas a mediados del siglo pasado para su uso en aplicaciones espaciales, destacando los programas SOYUZ y APOLLO. Dicha eficiencia puede llegar al 70%.

Técnicamente se caracterizan por el uso de hidróxido de potasio como electrolito, cuya concentración determina el nivel térmico de la pila, que puede llegar a los 250°C con concentraciones del 85%, pero que se puede mantener en niveles térmicos inferiores, hasta prácticamente temperatura ambiente con concentraciones menores, que parten sobre el 35%.

Por su parte, los electrodos pueden usar un amplio rango de metales, tanto nobles (ánodos de platino/paladio y cátodos de oro/platino), como metales no preciosos.

Cabe destacar la sensibilidad de esta tecnología a la contaminación por CO₂, que es absorbido por el hidróxido potásico formando carbonato potásico y reduciendo de forma drástica la eficiencia eléctrica de la celda. Por lo anterior estas pilas deben alimentarse con hidrógeno y oxígeno de alta pureza, dado que incluso con niveles de CO₂ de 400ppm ya se percibe este efecto en el rendimiento. Este envenenamiento no solo afecta al rendimiento, sino también a la vida útil del dispositivo. Incluso con pequeñas concentraciones (10 a 100 ppm) se produce el "envenenamiento" de la pila por monóxido o dióxido de carbono. Por este motivo, se utilizan principalmente en el sector aeroespacial y ambientes submarinos.

2.4.2 Estanque de Hidrógeno

2.4.2.1 Generalidades del Almacenamiento de Hidrógeno

El hidrógeno tiene la mayor densidad energética por unidad de masa de todos los combustibles químicos, sin embargo, su densidad energética por unidad de volumen es sustancialmente menor, como se observa en la Figura 2-7. La baja densidad energética por volumen del hidrógeno gaseoso hace que el almacenamiento y el transporte del gas sea un desafío difícil de sortear.

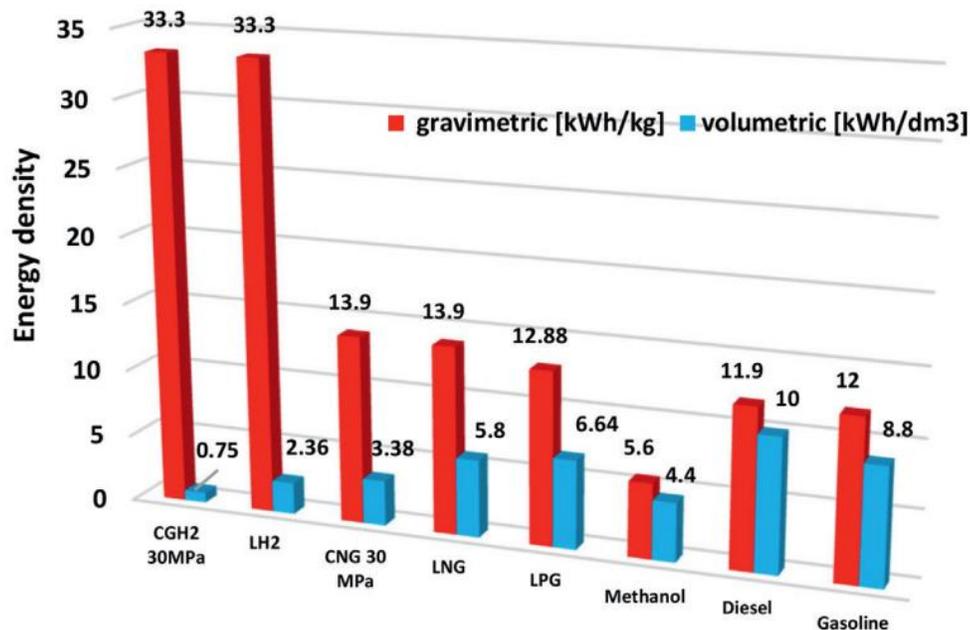


Figura 2-7: Densidad energética por unidad de masa y volumen de varios combustibles químicos

Fuente: [24]

La forma de almacenamiento más común es el almacenamiento físico. Esta forma de acumulación se basa en la compresión del hidrógeno o en su licuefacción y enfriamiento, dependiendo del estado del hidrógeno.

En estado gaseoso, el hidrógeno se almacena a alta presión, generalmente entre 350 y 700 bar y se realiza en cilindros o tanques especializados, que permiten almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un espacio relativamente reducido. Este enfoque es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, como la distribución de hidrógeno para diversas industrias, o en estaciones de repostaje para vehículos a hidrógeno. Sin embargo, los sistemas de alta presión requieren materiales resistentes y tecnologías avanzadas para garantizar la seguridad, así como un consumo energético adicional para mantener la presión de manera constante.

Por otro lado, el almacenamiento líquido implica licuar el hidrógeno mediante un enfriamiento criogénico a temperaturas alrededor de -253°C . Esta técnica ofrece una mayor densidad energética por volumen, lo que facilita el almacenamiento y transporte de grandes cantidades de hidrógeno, especialmente para aplicaciones que requieren grandes volúmenes de energía. Sin embargo, la licuefacción es un proceso que consume una cantidad significativa de energía y requiere infraestructuras especializadas para mantener el hidrógeno en estado líquido.

Este método corresponde a la forma general de almacenar el hidrógeno, ya sea en plantas de electrólisis, estaciones de carga o dentro de los vehículos. A continuación, este último punto se describe con mayor detalle.

2.4.2.2 Almacenamiento de Hidrógeno en los Vehículos de Transporte Pesado

2.4.2.2.1 Almacenamiento de Hidrógeno Gaseoso

En el transporte pesado el hidrógeno gaseoso se almacena en tanques de alta presión, situados generalmente en el chasis del vehículo, en zonas donde no interfieran con la carga útil o el diseño del vehículo, como por ejemplo el techo, como indica la Figura 2-8. Estos tanques están fabricados con materiales compuestos, como

fibra de carbono o aluminio, que les permiten soportar las altas presiones de hasta 700 bar, necesarias para almacenar una cantidad suficiente de hidrógeno para que el vehículo pueda recorrer distancias significativas.



Figura 2-8: Ejemplo de ubicación de tanques de hidrógeno en un bus de pasajeros

Fuente: [25]

El hidrógeno gaseoso comprimido (CGH₂ en la Figura 2-7) se almacena a presiones de 250 a 900 bar en tanques ligeros, generalmente de tipos III y IV. La Figura 2-9 indica los tipos de tanques, con su descripción en la Tabla 2-10.

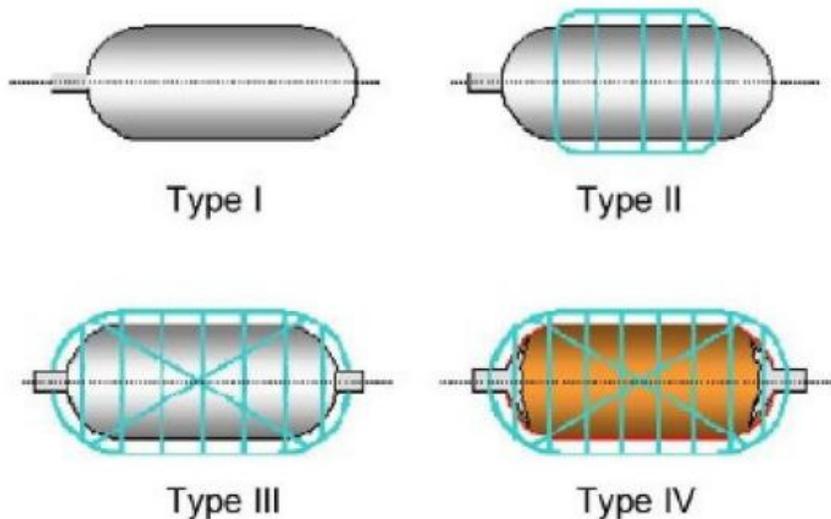


Figura 2-9: Tipos de tanques de hidrógeno

Fuente: [26]

Tabla 2-10: Resumen de características principales de los tipos de tanques de hidrógeno

Característica	Tanque Tipo I	Tanque Tipo II	Tanque Tipo III	Tanque Tipo IV
Materiales Comunes	Acero o aleación de aluminio	Estructura metálica envuelta con compuesto de resina y fibra	Carcasa de plástico reforzado con fibra de carbono con revestimiento de aluminio	Polietileno de alta densidad (HDPE)
Presión Máxima de Almacenamiento	200 – 300 bar	300 – 500 bar	450 – 750 bar	Hasta 700 bar
Peso	El más pesado (paredes metálicas gruesas)	30-40% más ligero que el Tipo I	25% más ligeros que el Tipo II	Más ligeros que el Tipo III
Ventajas Principales	El más económico	Más ligeros que el Tipo I con hasta el doble de presión máxima de almacenamiento	Alta capacidad de almacenamiento, ligero y duradero	Ligero, adecuado para altas presiones
Desventajas Principales	Peso elevado, inadecuado para aplicaciones a bordo	Baja densidad de almacenamiento, inadecuado para aplicaciones a bordo	Baja tasa de liberación de calor debido a su baja conductividad térmica	Baja resistencia mecánica comparada con revestimientos metálicos

Fuente: [26]

2.4.2.2.2 Almacenamiento de Hidrógeno Líquido

Si bien actualmente, el hidrógeno comprimido es la tecnología de almacenamiento de hidrógeno más ampliamente adoptada, su baja densidad energética y las preocupaciones sobre seguridad han motivado a los investigadores a investigar métodos alternativos, como el hidrógeno líquido. El desarrollo de sistemas de producción y almacenamiento de hidrógeno líquido se aceleró con la investigación y producción de propulsión de cohetes basada en oxígeno e hidrógeno líquidos durante las décadas de 1930 y 1950. Como resultado, se construyeron sistemas a escala industrial para satisfacer la creciente demanda de hidrógeno líquido en estos sectores.

Como se mencionó anteriormente, el hidrógeno exhibe una densidad energética por unidad de volumen inferior a la de muchos otros combustibles, lo que implica la necesidad de tanques de almacenamiento más grandes para almacenar la misma cantidad de energía. Para abordar este problema, la licuefacción del hidrógeno es una solución potencial. El hidrógeno comprimido a 350 y 700 bar y 288 K tiene una densidad de 24.5 y 41.5 g/L, respectivamente, y valores de calor de 2.94 y 4.97 MJ/L. En contraste, el hidrógeno en forma líquida a 1 y 3.5 bar y a su punto de ebullición normal de 20 K (-253 °C) tiene un valor calorífico de 8.50 y 7.68 MJ/L, respectivamente, y una densidad de 70.9 y 64.0 kg/m³, respectivamente [26]. Sorprendentemente, el hidrógeno líquido es aproximadamente 1.8 veces más denso que el hidrógeno a alta presión a 700 bar y 288 K, lo que resalta sus posibles ventajas en el almacenamiento y transporte de energía.

Como resultado de su mayor densidad por unidad de masa y volumen, el hidrógeno líquido ahora se considera ampliamente como la opción óptima para el transporte y distribución, ofreciendo ventajas significativas en

términos de economía, viabilidad técnica y contenido energético. No obstante, el hidrógeno líquido también tiene varias desventajas que deben abordarse. Uno de los problemas más importantes del hidrógeno líquido es el proceso de licuefacción, que consume hasta el 30% del contenido energético del hidrógeno almacenado [26]. Además, para minimizar la evaporación, es necesario mantener una presión constante en el tanque de almacenamiento y asegurarse de que esté bien aislado. También debe existir un sistema de enfriamiento y ventilación para lograr esto.

Para almacenar hidrógeno en forma líquida, es esencial mantener la temperatura del hidrógeno por debajo de su punto de ebullición de 20 K para evitar la sobrepresión en el contenedor de almacenamiento, lo que se puede lograr ventilando hidrógeno del tanque a través de una válvula, un proceso conocido como “boil-off”. Por lo tanto, es necesario un recipiente de almacenamiento criogénico con aislamiento eficaz para evitar la pérdida de hidrógeno por ventilación y extender el tiempo de almacenamiento sin pérdidas. A pesar del alto nivel de aislamiento en los recipientes de almacenamiento criogénico, el “boil-off” es un fenómeno inevitable, lo que resulta en una pérdida de hidrógeno de 2 a 3% por día.

El hidrógeno líquido se almacena en tanques criogénicos que son recipientes de doble pared cilíndricos o esféricos, donde las paredes internas y externas están separadas por múltiples capas de vacío para proporcionar aislamiento térmico, como se muestra en la Figura 2-10.

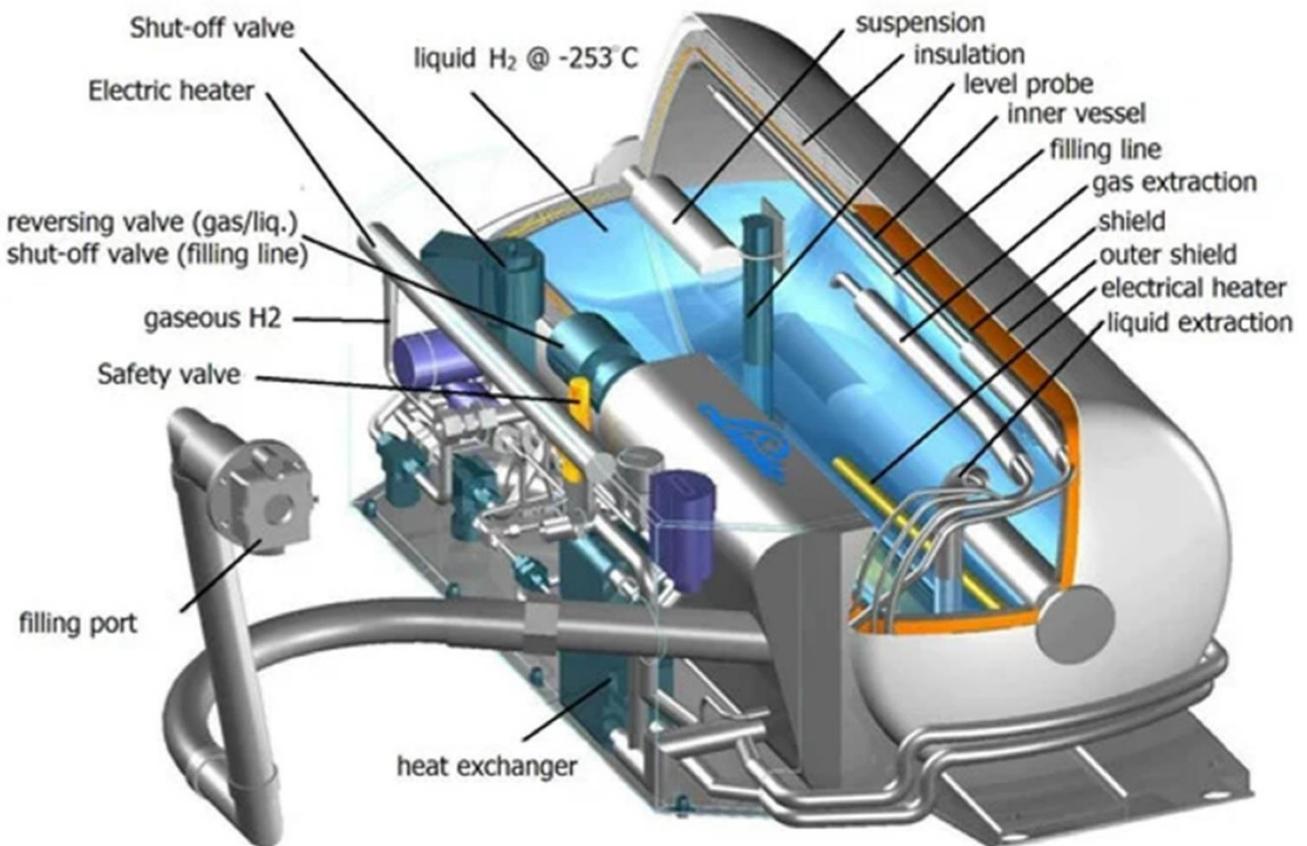


Figura 2-10: Esquema interior de estanque de almacenamiento de hidrógeno líquido

Fuente: [26]

2.4.3 Baterías Eléctricas

Las baterías son dispositivos que almacenan energía química y la liberan como energía eléctrica cuando se conectan a un circuito. Están compuestas por celdas electroquímicas que contienen dos electrodos o terminales eléctricas y un electrolito, el cual permite que los iones se muevan entre los electrodos. El funcionamiento de este componente se basa en un proceso químico reversible conocido como reducción-oxidación, también llamado Redox. La reacción consiste en un intercambio de electrones entre los dos electrodos, lo que produce una corriente eléctrica utilizada en un circuito.

Como la reacción Redox es un proceso reversible, las baterías pueden ser recargadas aplicando una corriente inversa al flujo de los electrones de la reacción. Aún con ello, durante los procesos de carga y descarga de una batería se van formando otras moléculas por la interacción entre compuestos, lo cual hace que cada recarga reduzca la capacidad de la batería, acortando su vida útil hasta que ésta se vuelve incompatible con el uso práctico.

Las baterías pueden ser clasificadas según su capacidad para ser recargadas una vez se agota su carga, en ese sentido se encuentran:

- **Las celdas primarias:** También conocidas como baterías no-recargables, transforman la energía química en energía eléctrica de manera irreversible.
- **Las celdas secundarias:** También conocidas como baterías recargables, las cuales pueden ser recargadas sin más que revertir las reacciones químicas en su interior mediante el suministro de energía eléctrica a la celda.

Los distintos tipos de baterías son nombradas según los componentes utilizados en su reacción. Las baterías más utilizadas en electromovilidad son las llamadas baterías de Ion-Litio (Li-Ion), las cuales se diferencian según los elementos que se utilicen en el cátodo. Las principales variantes utilizadas actualmente son:

Tabla 2-11: Características principales de baterías eléctricas utilizadas en electromovilidad

Tipo	Cátodo	Densidad energética (Wh/kg)	Ciclos de vida	Costo instalado (USD/kWh)	Cuota de Mercado Global	Ventajas	Inconvenientes
Li-NMC	Níquel-Manganeso-Cobalto (NMC)	150-220	1000-2000	504	53%	Alta capacidad de almacenamiento.	Alto coste debido a la presencia de Cobalto.
						Gran durabilidad.	
						Capacidad de soportar cargas rápidas.	Riesgo de incendio ante perforaciones.
LPF	Fosfato de Hierro y Litio (LiFePO4)	90-120	3000	448	40%	Bajo costo.	Menor densidad energética.
						Alta seguridad.	
						Larga vida útil.	

Fuente: [27] y [16]

2.4.4 Motores Eléctricos

Los motores eléctricos son máquinas capaces de transformar la energía eléctrica almacenada, por ejemplo, en una batería, en energía mecánica. Diferenciándose así de los motores de combustión interna (ICE) tradicionales cuya fuente de energía es la química.

Existen distintos tipos de motores eléctricos utilizados en electromovilidad, los cuales pueden ser categorizados en motores de corriente continua u alterna, según las características de la corriente que utilicen. A continuación se presenta un resumen de los principales motores utilizados en electromovilidad:

Tabla 2-12 Motores más utilizados en electromovilidad.

Motor	Corriente utilizada	Características	Ventajas	Inconvenientes
Brushless DC motor (BLDC)	Continua	Utiliza un sistema de conmutación electrónica para generar un campo magnético rotatorio que interactúa con un conjunto de imanes conectados al rotor.	Construcción sencilla	No logra generar grandes potencias de manera práctica.
			Bajo desgaste de componentes	
			Bajo mantenimiento	
			Alto par de arranque	
			Alta eficiencia	
Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM)	Alterna	Utiliza un conjunto de bobinas que, debido a la circulación de corriente alterna, generan un campo magnético variable, el cual interactúa con un conjunto de imanes conectados al eje rotor.	Alta densidad de potencia	Alto coste debido a los imanes permanentes.
			Alta eficiencia	Requiere de un variador de frecuencias para controlar la velocidad
			Bajo mantenimiento	
			Diseño compacto	
Asynchronous Induction Motors	Alterna	Utiliza un conjunto de bobinas que, debido a la circulación de corriente alterna, generan un campo magnético variable, el cual induce un campo magnético en las espiras del rotor.	Menor costo al no poseer imanes	Dificultad para enfriarse durante operaciones prolongadas
			Bajo mantenimiento	Menor eficiencia
			Alta durabilidad	Menor densidad de potencia
Electrically Excited AC Synchronous Motors	Alterna	Funciona de igual manera que un PMSM solo que en vez de utilizar un imán en el rotor, genera un campo magnético a partir de un bobinado con corriente continua.	Menor costo al no poseer imanes	Mayor consumo energético debido al rotor
			Alta densidad de potencia	Requiere de un variador de frecuencia para controlar la velocidad
			Alta densidad de potencia	Mayor costo de mantenimiento debido a las escobillas en el rotor

Fuente: [28]

2.4.5 Sistemas de gestión energética

En un vehículo eléctrico existen variados requisitos de energía eléctrica para la correcta operación de éste. El sistema de gestión de potencia es el encargado de administrar y transformar la energía eléctrica proveniente de las baterías para ser utilizada en los distintos componentes del vehículo. Para ello, se utilizan dispositivos de electrónica de potencia que permiten convertir la energía eléctrica según se requiera [29].

Un esquema generalizado de la configuración del sistema de potencia de un vehículo eléctrico se presenta en la Figura 2-11, en donde se muestran los principales componentes del sistema de gestión y las conexiones entre ellos.

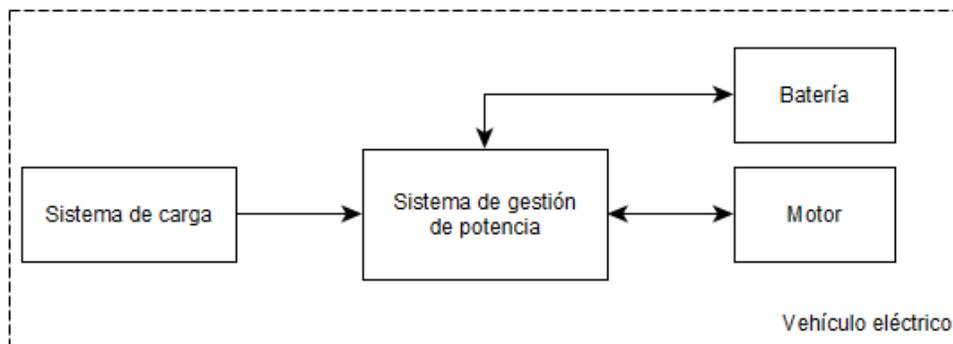


Figura 2-11 Esquema generalizado de gestión energética.

La función principal del sistema controlador de potencia es la conversión y control efectivo de la energía eléctrica. Con la batería como fuente de energía primaria, es necesario emplear dispositivos de electrónica de potencia para gestionar y transformar esta energía.

En primer lugar, este sistema se encarga de la conversión de la corriente continua de la batería en corriente alterna (AC) para el motor, para ello, utiliza un inversor eléctrico, el cual, a partir de una carga de corriente continua y por medio de la conmutación de transistores, genera una onda sinusoidal simulada, pudiendo regular tanto la amplitud como la frecuencia de la onda, con lo que es capaz de modular la potencia entregada al motor según los requisitos del conductor en tiempo real.

Por otro lado, los vehículos eléctricos cuentan con un tipo de freno llamado “frenado regenerativo”, el cual convierte la energía cinética del vehículo, la cual se pierde como calor en los vehículos convencionales, en energía eléctrica. Este sistema funciona de manera tal que el frenado de las ruedas hace que el eje del motor gire, provocando que éste se comporte como un generador eléctrico, produciendo energía eléctrica útil para cargar la batería o alimentar los sistemas auxiliares. Para lograr esta carga es necesario transformar la corriente alterna producida por el motor en corriente continua, para lo que se requiere un equipo llamado rectificador. Esta operación requiere un control preciso sobre el inversor para mantener la estabilidad, asegurando que la cantidad correcta de energía sea devuelta a la batería, al mismo tiempo que se proporciona suficiente fuerza de frenado. Los algoritmos de control que se ejecutan en segundo plano, generalmente como parte de la unidad de control electrónico (ECU) del vehículo, deben tener en cuenta el estado de carga de la batería y la solicitud de frenado del conductor, entre otros parámetros.

Adicional a lo anterior, los vehículos eléctricos requieren de elementos auxiliares para su funcionamiento como lo son: luces, aire acondicionado, motores de alza vidrios, etc. Los cuales utilizan corriente continua proveniente de la batería o del frenado regenerativo. Esta distribución es administrada por el sistema de gestión, el cual determina en cada instante el suministro eléctrico a los distintos elementos.

La electrónica de potencia también es indispensable en los sistemas de gestión de baterías (BMS, por sus siglas en inglés). Estos sistemas supervisan la salud, seguridad y uso óptimo de la batería, asegurando su larga vida útil y utilización eficiente de la energía. Los sofisticados sistemas de carga regulados por la electrónica de potencia permiten la carga rápida y eficiente de las baterías de los vehículos mientras mantienen sus límites operativos seguros.

Por último, el sistema de gestión está encargado de administrar la carga de la batería desde el suministro energético o sistema de carga, este sistema corresponde a la fuente de energía eléctrica externa al sistema de gestión. En el caso de los vehículos eléctricos convencionales, este sistema corresponde al puerto de carga de energía, mientras que, en los vehículos con pila de combustible, corresponde a la salida de las *Fuel Cells*. Para ambos casos, el sistema de gestión energética posee un regulador de carga, el cual determina la porción de potencia que se suministra a la batería y la que se suministra al resto del vehículo. Este sistema toma una mayor importancia en los vehículos con pila de combustible pues, a diferencia de los vehículos eléctricos convencionales, la energía eléctrica que carga la batería y alimenta el motor se genera durante la conducción.

2.4.6 Motores Alternativos de Combustión Interna

2.4.6.1 Generalidades

Como se describió en el capítulo 2.3.3, los motores de combustión interna (ICE) corresponden a máquinas térmicas capaces de transformar la energía química de un combustible en energía mecánica a través del proceso de combustión, el cual se desarrolla al interior del motor, lo que le da su nombre distintivo. El adjetivo “alternativos” se agrega cuando, como en el contexto de este estudio, no se utilizan combustibles fósiles. Los ICE en general pueden ser de dos o cuatro tiempos, lo que implica la cantidad de “pasos” de funcionamiento del motor. En general, los ICE de dos tiempos se utilizan en vehículos ligeros, por lo que este estudio se concentrará en los de cuatro tiempos, utilizados en vehículos pesados. Además, los ICE pueden funcionar bajo el ciclo termodinámico Otto o Diésel (como fue mencionado previamente).

En términos generales un ICE alternativo funciona igual que un ICE convencional. A continuación, se describen los cuatro pasos o “tiempos” del funcionamiento del motor, identificando en cada caso las diferencias para ciclo Otto y Diésel, los que se ilustran además en la Figura 2-12.

1. **Admisión:** El pistón desciende dentro del cilindro, creando un vacío parcial que permite la entrada de aire y combustible en el caso de los motores de ciclo Otto (en forma de mezcla o por inyección directa, dependiendo del diseño del motor). Esto ocurre mientras la válvula de admisión está abierta. En el caso de los motores de Ciclo de Diésel, sólo entra aire al cilindro, con el combustible siendo agregado en los pasos siguientes.
2. **Compresión:** El pistón asciende nuevamente, comprimiendo la mezcla de aire y combustible (o sólo aire) en el espacio reducido de la cámara de combustión. Esta compresión aumenta la temperatura y la presión de la mezcla, preparándola para la ignición.
3. **Expansión (o Combustión):** Una chispa producida por la bujía (en motores Otto) enciende la mezcla, produciendo una combustión controlada. Los gases calientes generados por esta combustión se expanden rápidamente, empujando el pistón hacia abajo. Este movimiento descendente es el que genera la energía mecánica. En el caso de los motores Diésel, el aire en el cilindro sufre una compresión mucho mayor que la de la mezcla en los motores Otto, lo que aumenta considerablemente su temperatura. En este punto se inyecta diésel atomizado, el cual combustiona espontáneamente debido a la temperatura del aire. Se produce la combustión y la posterior expansión de gases empujando también el pistón.
4. **Escape:** Finalmente, el pistón vuelve a subir, empujando los gases quemados fuera del cilindro a través de la válvula de escape. Este proceso deja el cilindro listo para un nuevo ciclo. Este paso es el mismo para los dos tipos de motor.

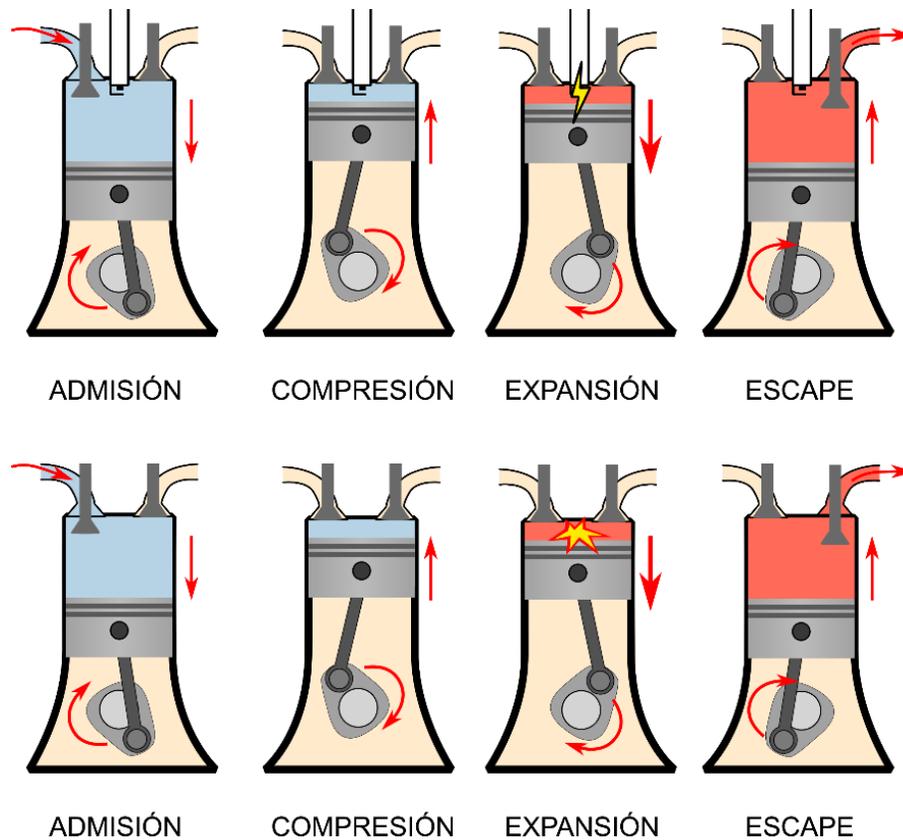


Figura 2-12: Esquema de funcionamiento de un ICE. Arriba: con Ciclo Otto. Abajo: con Ciclo Diésel

Fuente: Elaboración propia

2.4.6.2 MICE: ICE de Metanol

Los motores de combustión interna de metanol (MICE), o también denominados "M100", son una tecnología que utiliza metanol como combustible principal. En el contexto del transporte pesado, ofrece ventajas como menores emisiones de carbono y una combustión más limpia. Estos motores son una adaptación de los ICE convencionales y se utilizan principalmente en sectores como el transporte marítimo, vehículos pesados de carga y generadores estacionarios.

Los ICE alternativos a metanol consideran pequeños cambios en relación a los motores tradicionales a diésel, ya que el metanol es un alcohol simple con propiedades diferentes a los combustibles fósiles tradicionales, lo que requiere de considerar modificaciones en los motores.

Las principales modificaciones se describen en la Tabla 2-13.

Tabla 2-13: Diferencias de los ICE para Ciclo Otto y Diésel con Metanol

Paso	ICE Ciclo Otto	ICE Ciclo Diésel
Admisión	Mismo proceso, pero se debe agregar más combustible que si fuese gasolina	Se debe introducir un poco de diésel a la mezcla aire-metanol para facilitar la combustión
Compresión	Se puede tener una relación de compresión más alta sin peligro de pre-ignición	En algunos casos, se puede modificar el motor para incorporar un sistema de bujías que facilite la combustión del metanol (es muy resistente a la autoignición)
Expansión	No cambia el proceso, pero se alcanzan mejores eficiencias térmicas debido a que el metanol enfría el cilindro al combustionar (alto calor de vaporización)	También se pueden usar sistemas que vaporizan el metanol antes de la compresión para garantizar una combustión eficiente. Dado que el metanol tiene un calor de vaporización alto, puede ser necesario precalentarlo en condiciones de arranque en frío
Escape	No cambia el proceso, pero las emisiones son distintas de las de la gasolina, sólo CO ₂ y vapor de agua. (Si el metanol es sintético o e-metanol, estas emisiones de CO ₂ han sido abatidas)	No cambia el proceso, pero las emisiones son distintas de las del diésel convencional, sólo CO ₂ , vapor de agua y menores cantidades de NO _x . (Si el metanol es sintético o e-metanol, estas emisiones de CO ₂ han sido abatidas)

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, la Tabla 2-14 identifica las ventajas y desventajas del uso de metanol en ICE.

Tabla 2-14: Ventajas y desventajas de la utilización de metanol en ICE

Ventajas	Desventajas
El combustible posee un alto octanaje con lo cual los motores de metanol pueden beneficiarse de una alta relación de compresión, lo que aumenta la eficiencia térmica, hasta niveles más altos que los de los motores diésel.	El metanol como combustible es tóxico para los seres humanos, por lo tanto, debe manipularse con adecuadas medidas de seguridad.
Los motores de metanol generan niveles muy bajos de emisiones de partículas debido a que su composición molecular contempla solo un átomo de carbono, al igual que en el caso del metano.	Para su utilización en transporte requiere de motores de combustión levemente adaptados y resistentes a la corrosión.

Ventajas	Desventajas
La combustión de metanol genera menos calor que los hidrocarburos convencionales, reduciendo la formación de óxidos de nitrógeno (NOx).	Debido a su menor densidad energética, se requieren tanques de almacenamiento más grandes o recargas más frecuentes generando menor autonomía.
El metanol se encuentra en forma líquida a temperatura y presión estándar, lo que lo hace relativamente fácil de manipular y almacenar.	El costo de producción aún es elevado, principalmente debido al costo de producción del hidrógeno verde y en segundo lugar debido a la infraestructura limitada para la captura del CO ₂ a gran escala.
Los motores existentes pueden ser modificados para operar con metanol, reduciendo los costos iniciales	Aunque el proceso está probado, la eficiencia global de la conversión de electricidad renovable a metanol aún tiene por mejorar.
	A la fecha se utilizan solo en motores duales con combustibles fósiles convencionales, sin embargo, investigaciones están desarrollándose para desarrollar soluciones de motores que puedan funcionar solo con Metanol.

Fuente: Elaboración Propia

2.4.6.3 HICEV: ICE de Hidrógeno Puro

Los motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno puro (HICE, por sus siglas en inglés) son una tecnología alternativa que aprovecha las propiedades del hidrógeno como combustible limpio. Aunque comparten similitudes con los motores tradicionales que funcionan con gasolina o diésel, se diseñan o modifican para abordar las características propias del hidrógeno.

En cuanto al principio de funcionamiento éstos funcionan al quemar hidrógeno en lugar de hidrocarburos. Esta combustión con oxígeno produce vapor de agua como subproducto, eliminando las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, a altas temperaturas, pueden generarse pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno (NOx), aunque en niveles mucho menores que en motores convencionales.

Las principales modificaciones se describen en la Tabla 2-15.

Tabla 2-15: Diferencias de los ICE para Ciclo Otto y Diésel con H₂ puro

Paso	ICE Ciclo Otto	ICE Ciclo Diésel
Admisión	El proceso es el mismo, con la diferencia de que se inyecta aire e hidrógeno gaseoso en el cilindro. A diferencia de la gasolina, el hidrógeno ingresa a través de un sistema de inyección de gas.	El hidrógeno se debe inyectar directamente al cilindro de forma gaseosa. El aire se introduce directamente en el cilindro junto al hidrógeno.
Compresión	Se puede tener una relación de compresión más alta sin peligro de pre-ignición	El proceso es el mismo, pero la combustión debe controlarse de forma precisa debido a la alta inflamabilidad del hidrógeno.

Paso	ICE Ciclo Otto	ICE Ciclo Diésel
Expansión	No cambia el proceso, pero se alcanzan mejores eficiencias térmicas debido a su baja energía de activación.	El proceso es el mismo que en los motores diésel regulares.
Escape	No cambia el proceso, pero las emisiones son distintas de las de gasolina, sólo vapor de agua y NOx en pequeñas cantidades si la combustión se produce de forma no ordenada.	No cambia el proceso, pero las emisiones son distintas de las de diésel, sólo vapor de agua y NOx en pequeñas cantidades si la combustión se produce de forma no ordenada.

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, la Tabla 2-16 identifica las ventajas y desventajas del uso de metanol en ICE.

Tabla 2-16: Ventajas y desventajas de la utilización de H2 puro en ICE

Ventajas	Desventajas
La combustión de hidrógeno no produce dióxido de carbono, contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero.	Aunque no se emite CO ₂ , a altas temperaturas pueden formarse óxidos de nitrógeno (NOx). Esto puede mitigarse mediante estrategias como la recirculación de gases de escape (EGR) o combustión pobre.
Los motores existentes pueden ser modificados para funcionar con hidrógeno puro, lo que permite la adaptabilidad tecnológica, reduciendo los costos de transición.	El hidrógeno tiene menor densidad energética volumétrica que los combustibles fósiles, lo que requiere tanques más grandes o sistemas de almacenamiento presurizados/criogénicos.
Los motores de hidrógeno pueden alcanzar una eficiencia térmica superior a la de los motores de gasolina o diésel.	Requiere de infraestructura de suministro de hidrógeno, lo que limita su adopción masiva.
Proporcionan un rango de potencia similar a los motores tradicionales.	Tanto el hidrógeno como las tecnologías relacionadas son actualmente más costosas que los combustibles fósiles y sus motores tradicionales.

Fuente: Elaboración Propia

2.4.6.4 Diésel Sintético

El diésel sintético (o e-diésel) se usa en ICE de la misma forma que los ICE de ciclo de diésel, por lo que no se requiere ningún tipo de adaptación o manejo en su operación. Esto representa una ventana competitiva importante para el uso de diésel sintético. A continuación, en la Tabla 2-17 se indican las ventajas y desventajas del uso de diésel sintético en ICE [13], [14]

Tabla 2-17: Ventajas y desventajas de la utilización de Diésel sintético en ICE

Ventajas	Desventajas
Se puede utilizar directamente en motores diésel existentes, sin necesidad de modificaciones. Esto incluye camiones, buses de transporte de pasajeros e incluso maquinaria pesada. Por lo tanto, no requiere de nuevas infraestructuras ni cambios en los vehículos o maquinarias.	Posee un mayor costo de producción y que es difícil de competir con el diésel fósil que al estar basado en petróleo crudo, se aprovecha de las infraestructuras de fabricación consolidadas y de las economías de escala. Se estima que el precio final podría fluctuar entre 2 a 4 veces que el diésel tradicional [30].
Es libre de azufre y otros compuestos nocivos presentes en el diésel fósil, lo que mejora la calidad del aire y además mejora la eficiencia de combustión en los motores. Además, requieren menos sistemas de postratamiento de emisiones.	El proceso completo de producción del hidrógeno, además de la captura de CO ₂ y la síntesis Fischer-Tropsch tiene una eficiencia menor al del diésel tradicional. Solo 30-50% de la energía inicial de las fuentes renovables se convierte en energía utilizable en el diésel sintético. Esto implica que se requiere generar más electricidad renovable para producir el mismo volumen de e-diésel.
Permite un rendimiento energético similar al diésel fósil, siendo ideal para aplicaciones donde se requiere alta eficiencia. La densidad energética del diésel tradicional es de aproximadamente 35,8 MJ/litro, mientras el diésel sintético alcanza densidades energéticas entre 35 y 36 MJ/litro.	Para que el e-diésel sea neutro en carbono requiere de capturar CO ₂ en procesos industriales o mediante captura directa del aire, lo que aumenta aún más los costos de producción e incluso puede llegar a limitar su disponibilidad, requiriendo infraestructura específica para este fin.
Mejora el encendido, reduce el ruido del motor e incrementa la eficiencia del motor en condiciones de carga variable, esto debido a que posee un número de Cetano mayor al del diésel tradicional. Este número mide la facilidad con la que el combustible se enciende bajo compresión, afectando la suavidad y eficiencia del motor. El diésel tradicional posee un número de Cetano entre 40 y 55, mientras el diésel sintético puede alcanzar valores de 70 a 80, según el diseño.	El e-diésel podría enfrentar desafíos regulatorios en los mercados, en donde se tengan que incorporar a los combustibles sintéticos.

Fuente: Elaboración Propia a partir de [13], [14]

2.4.7 Sistemas de Carga

2.4.7.1 Características Generales

Los sistemas de carga de hidrógeno (HRS, por sus siglas en inglés) para el transporte pesado corresponden a la infraestructura diseñada para suministrar el hidrógeno como gas comprimido o líquido a los vehículos del transporte pesado. El proceso de suministro comienza con la recepción del hidrógeno, que puede producirse en el sitio o transportarse desde una planta externa. El hidrógeno se almacena en tanques a alta presión o en sistemas criogénicos, dependiendo de su estado. Si el hidrógeno es gas comprimido, se utiliza un sistema de compresión para alcanzar las presiones requeridas, generalmente 350 o 700 bar. En el caso de hidrógeno líquido, se mantiene a temperaturas criogénicas (-253°C) hasta el momento de la dispensación al vehículo. Los

dispensadores están diseñados para transferir el hidrógeno al vehículo incorporando sistemas de refrigeración y monitoreo.

2.4.7.1.1 Descripción general de los sistemas

Toda estación está compuesta de tres grandes sistemas, los que se describen a continuación.

Almacenamiento

El sistema de almacenamiento consiste en grandes estanques en donde se acumula el hidrógeno, ya sea en estado líquido o gaseoso. En estado de gas comprimido debe estar almacenado a presiones (de entre 200 a 700 bar). En estado líquido el hidrógeno debe mantenerse a -253°C y ser convertido a gas antes de cargar el vehículo. Este sistema se encuentra presente en todos los tipos de estaciones, incluyendo aquellas en las que la producción es externa. En este caso el hidrógeno puede ser transportado desde la planta de producción a la estación mediante tuberías o puede ser transportado mediante vehículos.

Sistema de Compresión

Corresponde al conjunto de equipos diseñado para aumentar la presión del hidrógeno a los niveles requeridos para su dispensación. En las estaciones que manejan hidrógeno gaseoso, la compresión es un proceso crítico, ya que el hidrógeno almacenado a presiones moderadas (entre 200 y 700 bar) debe ser comprimido a niveles de alta presión, generalmente 350 o 700 bar, dependiendo del tipo de vehículo. Este proceso se realiza mediante compresores mecánicos, como los de pistón o diafragma, que incluyen múltiples etapas de compresión y sistemas de enfriamiento para disipar el calor generado. Por otro lado, en las estaciones de hidrógeno líquido, el proceso de compresión es diferente, ya que el hidrógeno almacenado a temperaturas de -253°C no requiere inicialmente compresión, sino un sistema de vaporización que lo convierte en gas antes de ser comprimido a alta presión para su dispensación. Esto implica el uso de tecnología criogénica especializada y diseños que minimizan pérdidas por evaporación.

Sistema de Dispensación

Corresponde al conjunto de equipos que permite transferir el hidrógeno almacenado hacia los vehículos de manera segura y eficiente. Este sistema consta principalmente de un dispensador, que incluye una boquilla de conexión estandarizada y mangueras de alta presión diseñadas para evitar fugas y soportar las condiciones del hidrógeno, ya sea comprimido o líquido.

En la Figura 2-13 se muestra una representación esquemática de los componentes generales de una estación de carga, con el detalle de los procesos asociados a cada componente de forma más precisa en la sección siguiente.

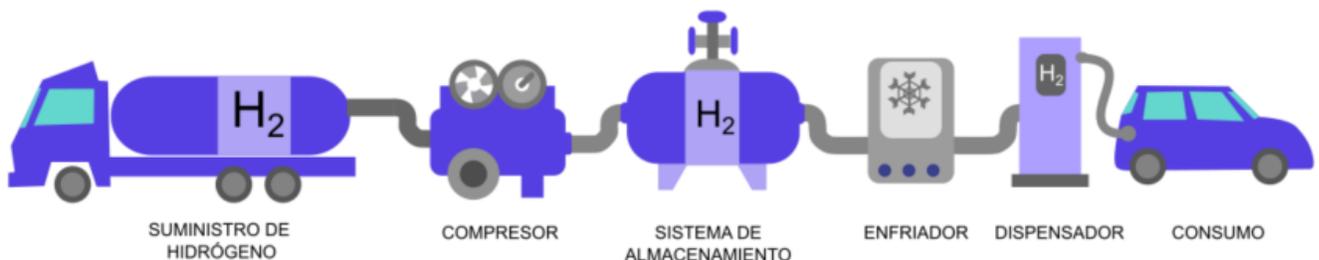


Figura 2-13: Representación esquemática de una estación de carga

Fuente: Elaboración propia

2.4.7.1.2 Descripción General del Proceso

Así como existe una cierta generalidad de componentes para todos los tipos de estaciones de carga, también existen generalidades en el proceso, desde que el hidrógeno es recibido en la estación hasta que es cargado en el vehículo. Estos pasos se describen a continuación.

- 1. Recepción del Hidrógeno en la Estación de Carga:** Independiente de si la estación de carga tiene una planta electrolizadora o no, el hidrógeno debe ser recibido y almacenado bajo las condiciones requeridas (ver capítulo 2.4.2.2)
- 2. Compresión:** Si el hidrógeno está en estado gaseoso, puede ser comprimido a altas presiones, típicamente entre 350 y 700 bar, que corresponden a las presiones a las que operan los vehículos pesados. Si es líquido, no se requiere compresión adicional, ya que ya se encuentra en un estado de alta densidad energética.
- 3. Acondicionamiento del gas:** Si el hidrógeno es gas, se ajusta la temperatura y presión para prepararlo para la carga. En el caso del hidrógeno líquido, es necesario mantenerlo a temperaturas criogénicas durante todo el proceso de carga para evitar su evaporación y mantener su densidad.
- 4. Transferencia del Hidrógeno al Vehículo:** Una vez que el hidrógeno está listo para ser cargado, se conecta una manguera de alta presión (si es gas) o una manguera criogénica (si es líquido) entre la estación de carga y el puerto de llenado del vehículo. Las mangueras criogénicas están diseñadas para soportar las bajas temperaturas del hidrógeno líquido. Si el hidrógeno es líquido, la manguera transferirá el hidrógeno a temperaturas muy bajas, directamente al depósito del vehículo sin necesidad de compresión. Si el hidrógeno es gas, se bombea a través de la manguera a una presión controlada.

Este proceso debe ser monitoreado durante toda la operación pues tanto las presiones como las temperaturas, siendo estas últimas cruciales para evitar que el hidrógeno se vaporice.

2.4.7.2 Características por Tipología

Las HRS pueden clasificarse de varias formas según distintos criterios, sin embargo, existen algunos que se consideran más relevantes pues impactan directamente la operación del sistema, sus componentes, etc. Por esto, se analizarán las estaciones siguiendo la siguiente clasificación:

1. Por movilidad
 - a. Fijas: Corresponden a las instalaciones permanentes ubicadas en sitios estratégicos como terminales de carga, centros logísticos o rutas principales de transporte. Tienen una capacidad de almacenamiento y dispensación mayor, y suelen estar integradas a la infraestructura existente.
 - b. Móviles: Corresponden a unidades transportables que pueden desplazarse para suministrar diferentes zonas de carga. Estas estaciones son útiles para complementar la infraestructura fija y responder a necesidades de carga en áreas menos desarrolladas o en eventos específicos. En este sentido, estas estaciones son particularmente útiles en aquellos sitios donde logísticamente sea complejo instalar una estación fija debido, por ejemplo, a la vegetación existente u otras condiciones de entorno complicadas.
2. Por estado del hidrógeno
 - a. Gas comprimido: El hidrógeno se debe almacenar a altas presiones (350 a 700 bar). Esta es una de las formas de almacenamiento más común, especialmente cuando se requiere una carga rápida.
 - b. Hidrógeno líquido: Requiere condiciones criogénicas para mantenerse a temperaturas muy bajas (-253°C). Dado que, en estado líquido, el almacenamiento del hidrógeno requiere menos espacio, es la forma de almacenamiento elegida cuando se desea altas capacidades de carga.
3. Por sitio de producción



- a. Producción en el sitio: En este caso, el hidrógeno se produce en la misma estación mediante electrólisis. Esta opción permite una integración más directa con fuentes de energía renovables y una mayor autonomía de suministro.
- b. Producción externa: En esta opción, el hidrógeno se produce en plantas de producción centralizadas y separadas de las estaciones, a las que se transporta el hidrógeno. Esta opción implica considerar los costos adicionales del método de transporte, ya sea mediante tuberías o mediante camiones.

A continuación, se caracterizan más en profundidad las distintas tipologías de estaciones de carga.

2.4.7.2.1 Por Movilidad

Las HRS pueden clasificarse según su capacidad de transportarse, en fijas y móviles. Cada una posee características y usos distintivos, los que explican a continuación.

Estaciones de Carga Fijas

Las estaciones de carga fijas se instalan en un lugar específico y permanente, como en estacionamientos, edificios comerciales o en puntos de recarga de acceso público. Los lugares donde se instalan estas estaciones deben elegirse estratégicamente, considerando el tipo de vehículo que pueden surtir. En ese sentido, estaciones de carga fijas para camiones de carga pesada deben ser instaladas en sectores donde las vías de acceso efectivamente permitan el peso de dichos camiones. Estas estaciones permiten trabajar con un sistema de producción de hidrógeno incorporado o mediante la recepción del hidrógeno producido externamente mediante camiones o tuberías. La Figura 2-14 muestra un ejemplo de estación de carga fija, con la primera de este tipo en Chile desarrollada por COPEC y Linde [31].



Figura 2-14: Estación de carga fija inaugurada en Chile en 2023 por COPEC

Fuente: [31]

Estaciones de Carga Móviles

Las estaciones de carga móviles son unidades portátiles que pueden trasladarse de un lugar a otro, ofreciendo flexibilidad en la provisión de carga cuando no existen estaciones fijas disponibles o en situaciones donde se necesita una solución temporal. Estas estaciones pueden estar montadas en vehículos o contenedores, lo que les permite ser transportadas a eventos, sitios de construcción, o zonas de emergencia. La Figura 2-15 muestra un ejemplo comercial de estación de carga móvil.



Figura 2-15: Estación de carga móvil

Fuente: [32]

2.4.7.2.2 Por Estado del Hidrógeno

Las HRS también pueden clasificarse según el estado en el que está el hidrógeno que manejan. Se describen a continuación.

Estaciones de Carga de Hidrógeno Gaseoso

Las estaciones de carga que manejan hidrógeno gaseoso básicamente tienen los mismos 3 sistemas de almacenamiento, compresión y dispensación generales, sin embargo, hay detalles característicos que se deben al estado gaseoso del hidrógeno.

El proceso de carga de hidrógeno gaseoso comienza cuando el gas es recibido en la estación, a través de camiones cisterna o mediante una red de distribución cuando existe producción externa, y a través de tuberías internas cuando la producción está en la misma estación. Una vez recibido, el hidrógeno se transfiere a los tanques de almacenamiento de la estación, donde se mantiene a alta presión, entre 200 y 700 bar, dependiendo de la infraestructura y el tipo de vehículo. Los tanques están diseñados para resistir altas presiones y se monitorean constantemente para garantizar que no haya fugas ni fallos en el sistema (ver Capítulo 2.4.2.2.1).

Si el hidrógeno llega a la estación a una presión más baja de la requerida, se somete a un proceso de compresión mediante compresores especializados. Este proceso eleva la presión del gas a niveles adecuados para la carga del vehículo. Es fundamental que la presión sea regulada con precisión, ya que el vehículo está diseñado para recibir hidrógeno a una presión específica. Además, durante la compresión, el hidrógeno se calienta, por lo que se implementa un sistema de refrigeración que enfría el gas antes de ser transferido al vehículo. Esto es necesario para evitar daños a las instalaciones y equipos del vehículo.

Una vez que el hidrógeno está a la presión y temperatura adecuadas, el hidrógeno pasa al dispensador, donde se conecta una manguera de carga al vehículo. La manguera está equipada con sistemas de acoplamiento rápido y mecanismos de seguridad que aseguran que no haya fugas ni derrames durante el proceso. En muchos casos, las conexiones son automáticas, lo que facilita una carga más rápida y eficiente. Durante la transferencia, la presión es controlada para evitar que el tanque del vehículo se sobrecargue, utilizando válvulas y sensores que monitorean tanto la presión del vehículo como la de la estación. La Figura 2-16 representa esquemáticamente este proceso.

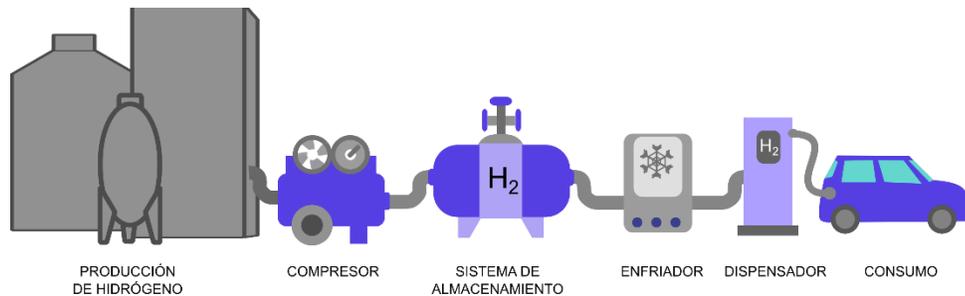


Figura 2-16: Estación de carga de hidrógeno gaseoso

Fuente: Elaboración Propia

Estaciones de Carga de Hidrógeno Líquido

En el caso del proceso de carga del hidrógeno líquido a un vehículo pesado, el proceso comienza cuando el hidrógeno líquido es recibido en la estación normalmente a través de camiones cisterna criogénicos que transportan el hidrógeno a -253°C , y presiones cercanas a 1 bar (ver Capítulo 2.4.2.2.2). El hidrógeno líquido se transfiere a los tanques de almacenamiento criogénico de la estación, los cuales están diseñados para mantener el hidrógeno a temperaturas constantes mediante aislamiento térmico y sistemas de control de presión. Estos tanques se mantienen generalmente a una presión de 1 a 2 bar para evitar la evaporación del hidrógeno, dado que cualquier incremento en la temperatura puede provocar la vaporización del gas.

En el dispensador, el hidrógeno líquido se transfiere al vehículo a través de una válvula de conexión, que garantiza una transferencia segura y eficiente del líquido criogénico. Durante el proceso, se monitorea y regula la presión y la temperatura en todo el sistema para evitar que el hidrógeno se evapore y para mantener la densidad adecuada del líquido en el tanque del vehículo. Además, como el hidrógeno líquido se encuentra a temperaturas extremadamente bajas, se deben tomar precauciones de seguridad adicionales, como el uso de guantes y ropa especial, para proteger al personal de quemaduras criogénicas. La Figura 2-17 representa esquemáticamente este proceso.

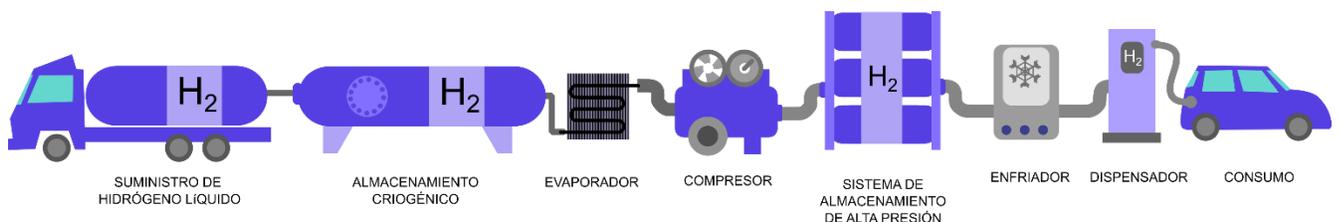


Figura 2-17: Estación de carga de hidrógeno líquido

Fuente: Elaboración Propia

2.4.7.2.3 Por Sitio de Producción

Finalmente, las estaciones de carga de hidrógeno pueden clasificarse según el sitio donde se produce el hidrógeno que dispensan.

Estaciones de Carga con Producción de Hidrógeno en el Sitio

Las estaciones de este tipo están pensadas para entregar una solución completamente autónoma. La producción del hidrógeno se produce en el mismo sitio de la estación, por lo que, dada su independencia de suministro externo se tiene una mayor flexibilidad en la operación de flotas de buses de pasajeros y camiones, especialmente en áreas alejadas de centros urbanos donde el abastecimiento de hidrógeno puede ser limitado. Además, esta integración permite una carga rápida, similar a la de los combustibles tradicionales, lo que optimiza el tiempo de inactividad de los vehículos y mejora la eficiencia operativa en sectores como el transporte y la logística. Sin embargo, existen también desafíos asociados con este tipo de estaciones. La inversión inicial en infraestructura es considerable, ya que se requiere de equipos especializados tanto para la producción como para el almacenamiento y distribución interna del hidrógeno, por lo que el ahorro producido debido a su autonomía debe poder compensar el aumento de los costos capitales.

Estaciones de Carga con Producción de Hidrógeno Externa

Estas estaciones se caracterizan por recibir el hidrógeno (gaseoso o líquido) desde un centro de producción externo y son las más comunes porque su nivel de inversión es significativamente más bajo que una estación con producción integrada. Debido a que no necesitan de infraestructura de producción, estas estaciones son en general más accesibles en términos de costos de instalación y operación, especialmente en áreas donde ya existe infraestructura de transporte de hidrógeno, como tuberías o camiones cisterna. Además, al centralizar la producción en instalaciones especializadas, se puede optimizar la eficiencia de la producción y, posiblemente, reducir los costos de producción de hidrógeno, pues las plantas externas pueden beneficiarse de economías de escala. La carga rápida de vehículos pesados en la estación también sigue siendo una ventaja clave, lo que mejora la eficiencia operativa en sectores de transporte y logística.

Sin embargo, existen varias desventajas asociadas con este modelo. Una de las principales limitaciones es la dependencia de una cadena de suministro externa, lo que puede generar vulnerabilidades en términos de disponibilidad y precios del hidrógeno, especialmente si se interrumpe el suministro por razones logísticas o de producción. Además, el transporte de hidrógeno a través de camiones cisterna o tuberías conlleva riesgos adicionales de seguridad debido a la naturaleza del hidrógeno por las propiedades ya discutidas en este informe. Esta infraestructura de transporte y almacenamiento del hidrógeno externo puede ser compleja y costosa de mantener, especialmente en áreas alejadas o en expansión. Finalmente, la necesidad de una red de distribución eficiente limita la ubicación y expansión de este tipo de estaciones, ya que debe existir una infraestructura adecuada para asegurar el suministro constante. En ese sentido, las estaciones de carga de tipo móvil son las más adecuadas para los modelos con producción externa.

2.5 Contexto Internacional

2.5.1 Consumo de Hidrógeno en el Sector Transporte

El uso de Hidrógeno, en cualquiera de sus formas: verde, azul o gris en el sector transporte, ha tenido un crecimiento sostenido en los últimos años evidenciándose aún más fuertemente en el año 2023, en donde el consumo de hidrógeno creció de aproximadamente 39 mil toneladas de Hidrógeno a unas 60 mil toneladas, resultando en un crecimiento de aproximadamente un 55% en un solo año. Como se puede observar en la siguiente figura, este crecimiento se debió principalmente a un aumento significativo en vehículos comerciales y en menor medida a buses de pasajeros. De acuerdo al *Global Hydrogen Review* [27] el 85% de este crecimiento se debió a vehículos de carga pesada.

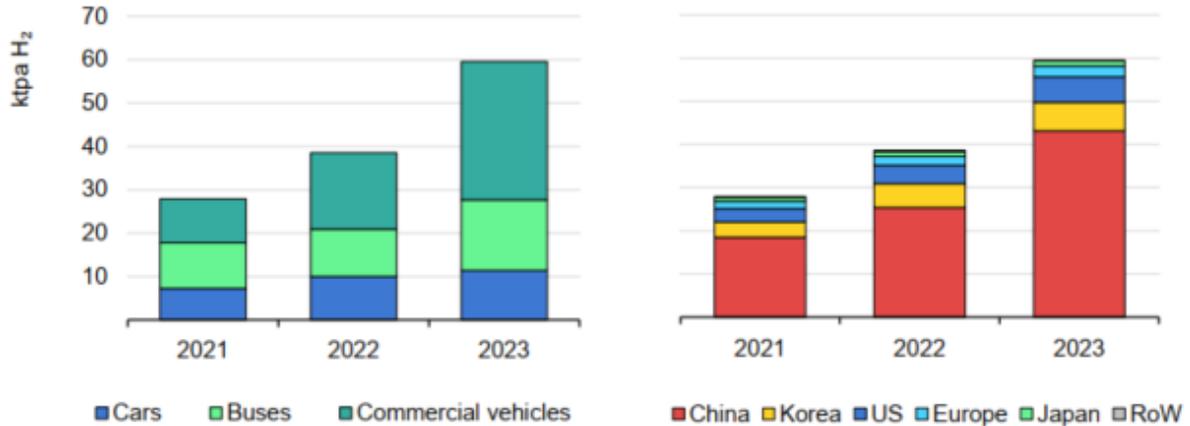


Figura 2-18: Consumo mundial de Hidrógeno en el sector transporte

Fuente: [27]

Desde el punto de vista geográfico, el uso del hidrógeno en este sector lo lidera China con más del 70% del consumo mundial, seguido muy de lejos por Korea y Estados Unidos con un poco más de un 10% cada uno, y en aún menor medida Europa, Japón y el resto del mundo (RoW: *Rest of World*) con menos del 10% restante.

Cabe destacar que China ha centrado su crecimiento principalmente en vehículos de carga, mientras otros países como Korea y Japón se han centrado más en vehículos livianos.

2.5.2 Stock de Vehículos

El stock total de vehículos de transporte en base a pilas de hidrógeno (FCEVs) ha llegado, a junio de 2024, hasta unas 93.000 unidades aproximadamente. De las cuales aproximadamente un 73% son vehículos livianos seguido de un 13% de camiones (12.000 unidades) y un 10% de buses (9.000 unidades).

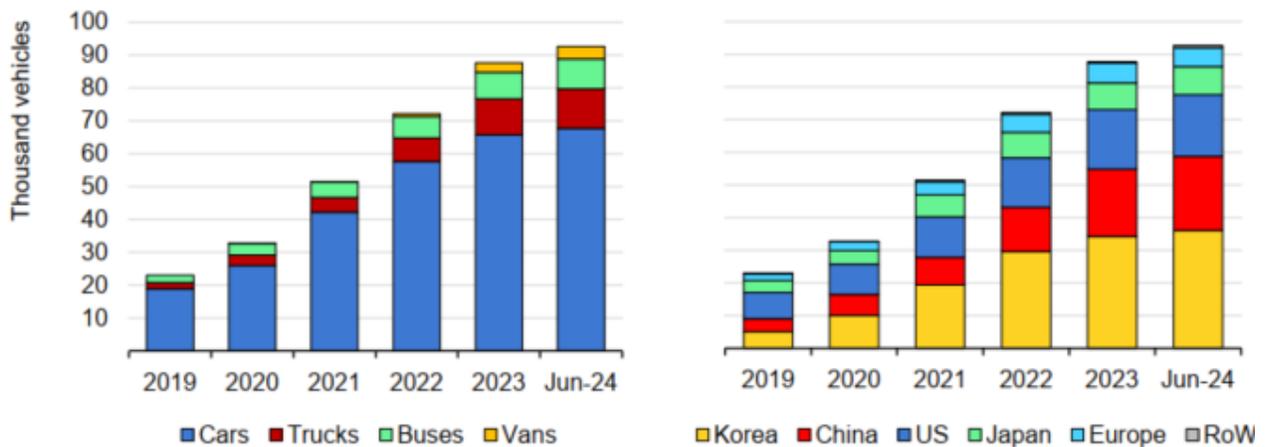


Figura 2-19: Número de vehículos en base a Pilas de Hidrógeno (en miles de unidades)

Fuente: [27]

Aunque el número de vehículos de carga y buses es menor a los vehículos livianos, de las gráficas se observa que estos últimos son los que han tenido un mayor crecimiento en los últimos años, observándose un crecimiento de un 50% anual en los camiones de carga.

De acuerdo al mismo estudio citado [27], el sector específico de vehículos de transporte de carga está liderado por China con prácticamente el 95% de este stock global. Este país también lidera el stock de buses con aproximadamente un 75% del total de buses en el mundo. Europa y Estados Unidos le siguen tanto en camiones como buses, pero con cifras considerablemente menores, observándose unos 1000 buses y 500 camiones en Europa y unos 800 camiones y 250 buses en Estados Unidos.

La siguiente gráfica también del *Global Hydrogen Review* [27] muestra a su vez el aumento de modelos diferentes de FCEVs por país y por tipología de vehículos pesados (buses y camiones)

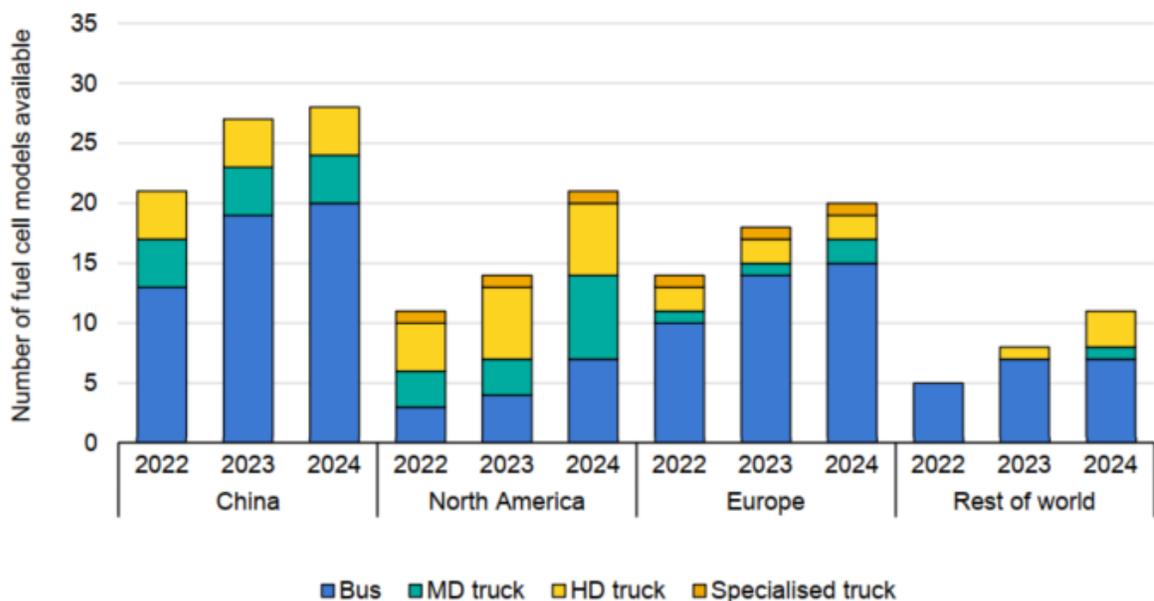


Figura 2-20: Número de modelos disponibles de buses y camiones de carga por región

Fuente: [27]

Donde:

- Bus: Diferentes tipos de buses de mínimo 25 asientos
- MD truck: camiones de carga media de entre 3,5 y 15 toneladas
- HD truck: camiones de carga pesada de sobre 15 toneladas
- Specialised trucks: camiones especializados de basura, mixer de hormigón, entre otros.

Cabe señalar que los fabricantes de Estados Unidos ofrecen la mayor disponibilidad de camiones de carga, mientras los fabricantes chinos ofrecen la mayor variedad de buses de pasajeros.

2.5.3 Estaciones de Carga

Finalmente, a nivel de estaciones de carga de hidrógeno, a 2024 se contabilizan 1.200 estaciones en operación en el mundo, con un incremento marginal en consideración a que muchas de éstas también han ido cerrando año a año.

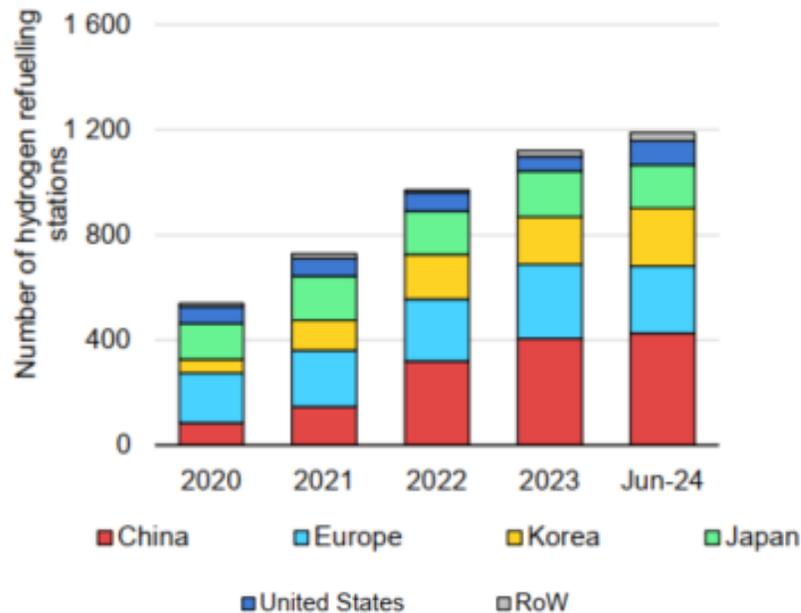


Figura 2-21: Número de estaciones de carga en operación de FCEVs por países en el mundo

Fuente: [27]

China nuevamente lidera el número de estaciones de carga en el mundo con aproximadamente 400 unidades, seguida por Europa con 280, Korea 180, Japón con 170 y Estados Unidos con 90 estaciones de carga principalmente en la costa este y California. De éstas se conoce, por ejemplo, que en Europa solo un 40% permite la carga de vehículos pesados, siendo las restantes solo pensadas para vehículos livianos. Dentro de Europa destaca Alemania y Francia con 90 y 60 estaciones de carga, respectivamente [33].

De acuerdo al *Global Hydrogen Review*, se espera que solo China construya más de 1.200 estaciones de carga en los próximos años, mientras el resto del mundo construya del orden de 340 unidades adicionales.

Cabe también destacar que tanto en Europa como en Estados Unidos han existido numerosos cierres de estaciones de carga debido a baja demanda, falta de oferta de hidrógeno e incremento en el precio del hidrógeno.

2.5.4 Almacenamiento del Hidrógeno

El hidrógeno comprimido, con presiones variables entre 350-700 bar, domina en transporte debido a su densidad energética, mientras que el hidrógeno líquido está emergiendo para vehículos de largo alcance, aunque con desafíos técnicos relacionados con la criogenia [34].

2.5.5 Competitividad

De acuerdo al estudio *“Path to Hydrogen Competitiveness”* [35] se señala que dentro de las aplicaciones que ofrecen una mejor estimación de trayectoria de competitividad en el futuro se encuentran los usos del hidrógeno en camiones de carga media y alta, además de los buses de pasajeros principalmente asociados a largas distancias. El estudio señala que muchos de estos usos tendrán competitividad no solo frente a tecnologías convencionales en base a combustibles fósiles, sino también respecto a tecnologías bajas en carbón, como corresponderían principalmente a los vehículos eléctricos con baterías. Los análisis indican que las oportunidades

de mayor competitividad vendrán asociadas a vehículos pesados con trayectos largos por sobre los vehículos livianos.

A nivel de factores que influyen la costo-competitividad del hidrógeno se puede apreciar que para el uso de camiones de carga, los factores clave tienen relación con la disponibilidad de producción y distribución del hidrógeno y en menor medida los costos de inversión propios del equipamiento. Situación muy diferente a lo observado para vehículos de pasajeros en los cuales los costos de inversión propios del equipamiento influyen mucho más en su competitividad frente a otras tecnologías. Estos factores se pueden observar en la siguiente figura.

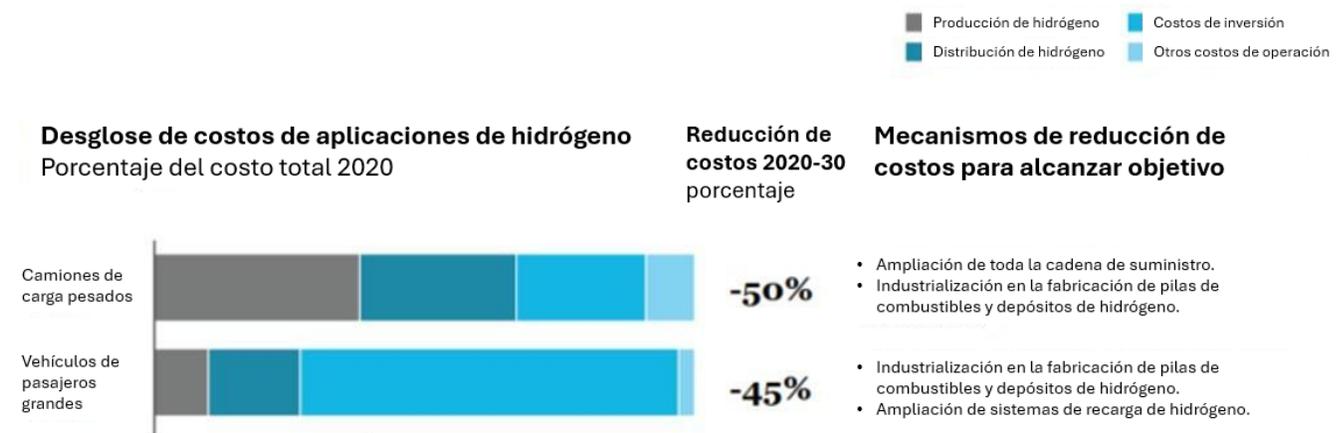


Figura 2-22: Factores influyentes en la costo-competitividad del hidrógeno

Fuente: Traducción de [35]

Así también es de importancia destacar que la competitividad vendrá de la mano de reducciones de costo significativas esperadas de un 45% a 50%, en donde la industrialización de la fabricación de pilas de combustibles y tanques de hidrógeno se ven como los aspectos más relevantes a seguir desarrollándose en la industria. Además, de los escalamientos de las cadenas de suministro del hidrógeno y de las estaciones de carga de hidrógeno (HRS).

En comparación con los vehículos con baterías eléctricas, se observa que la principal competitividad de los vehículos de carga pesada y de transporte de pasajeros a hidrógeno está en la reducción significativa de los tiempos de carga que los habilita en especial para cubrir grandes distancias y también para alcanzar cargas más pesadas, ya que no requieren de grandes baterías que tienen un peso muy significativo, así como un costo de inversión elevado.

2.5.6 Proyección de Costos

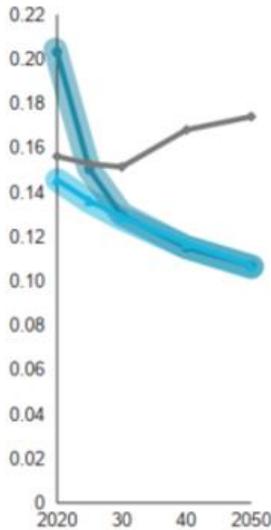
Los análisis internacionales prevén en general disminuciones importantes en el futuro asociados a los costos totales de propiedad (TCO, por sus siglas en inglés), que permiten visualizar la competitividad de los vehículos a hidrógeno, en relación por una parte a vehículos con baterías eléctricas (BEV, por sus siglas en inglés) y a vehículos con motores a combustión interna (ICE, por sus siglas en inglés).

A nivel de camiones de carga, se espera que los TCO se reduzcan fuertemente hasta el año 2050 alcanzando mejor competitividad frente a los vehículos convencionales (ICE) generalmente a partir del año 2030, sin embargo, la competitividad frente a vehículos con baterías eléctricos (BEV) es menos clara, especialmente en vehículos de carga liviana, evidenciándose mejoras en vehículos de mayor carga. La siguiente figura muestra estas estimaciones.

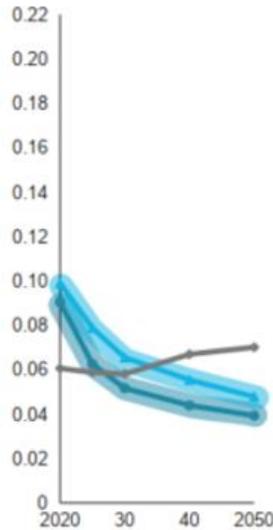
TCO para camiones USD/ton por km

◆ FCEV ◆ BEV ◆ ICE

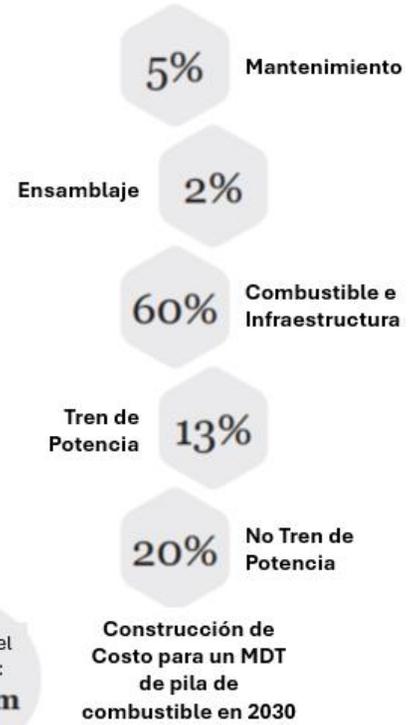
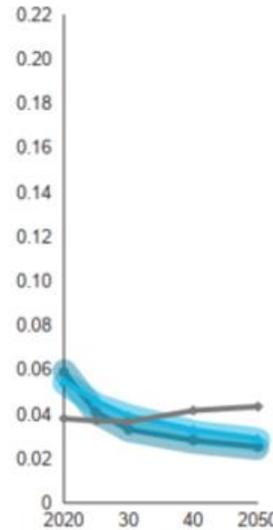
LCV para transporte urbano



MDT para transporte regional



HDT para transporte de larga distancia



LCV: Light Commercial Vehicles (Vehículos Comerciales Livianos); MDT: Medium Duty Trucks (Camiones de Carga Mediana); HDT: Heavy Duty Trucks (Camiones de Carga Pesada)

Figura 2-23: Costo Total de Propiedad (TCO) para camiones de carga

Fuente: Traducción de [35]

Por su parte, en cuanto a buses de pasajeros, se espera que los TCO se reduzcan fuertemente también alcanzando mejor competitividad frente a vehículos convencionales (ICE) incluso antes del año 2030, sin embargo, la competitividad frente a vehículos con baterías eléctricas (BEV) es también menor, en especial para aplicaciones urbanas de cortas distancias. A diferencia de usos de largas distancias donde se espera alcanzar menores precios que los vehículos eléctricos con batería. La siguiente figura muestra estas estimaciones.

TCO para buses USD/ton por km

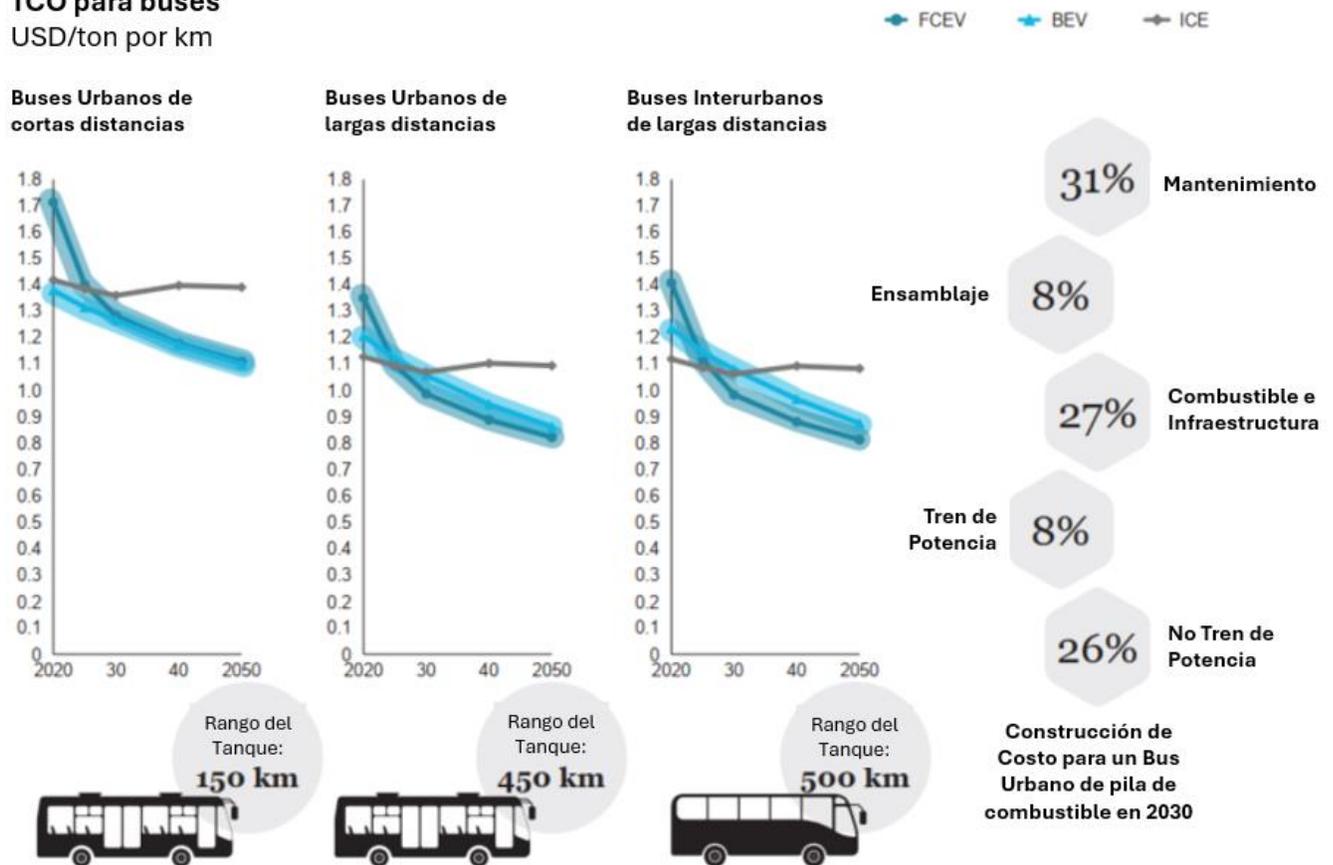


Figura 2-24: Costo Total de Propiedad (TCO) para buses de pasajero

Fuente: Traducción de [35]

2.5.7 Casos de Estudio

Se presentan un conjunto de 5 casos de estudio de diferentes usos de camiones y buses a hidrógeno tanto en algunos países de Europa como Estados Unidos de tal forma de observar el desempeño de éstos y su comparación con otras tecnologías.

2.5.7.1 Camiones de Carga

2.5.7.1.1 Caso Camión de Carga de la Compañía Bioway en Eslovaquia

El caso de estudio se sitúa en una ruta de larga distancia de 406 km entre las ciudades de Košice y Bratislava en Eslovaquia.

Los camiones de carga utilizados son de tipo tracto camión de 2 ejes y de 40 toneladas los cuales transportan cargas variables principalmente de bajo peso (en torno a 10 ton), pero alto volumen.

El caso de estudio contempla una flota de 15 camiones con un kilometraje anual de aproximadamente 130.000 km por cada uno, ocasionando un consumo de 0,08 kg/km de hidrógeno y de 500 kg/día considerando toda la flota de camiones, que a su vez generan un ahorro de emisiones de 135 ton de CO₂ al año.

La siguiente gráfica muestra los Costos Totales de Propiedad (TCO) comparando tecnologías convencionales a diésel, 3 alternativas de camiones a pila de combustible a hidrógeno y camiones con baterías eléctricas (BEV) tanto para un escenario proyectado a corto plazo (2023), considerando que el estudio se publicó en 2020; así como a mediano plazo (2030).

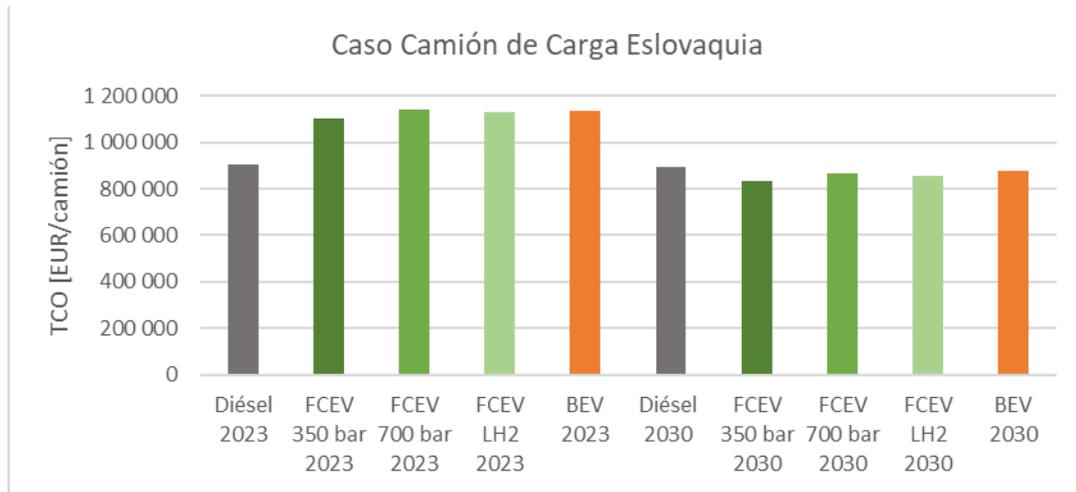


Figura 2-25: Costos Totales de Propiedad (TCO) para caso de estudio de flota de camiones en Eslovaquia

Fuente: Elaboración propia en base a [5]

Se aprecia que en la actualidad el TCO de los camiones FCEV y BEV superan en más de un 20% a los camiones convencionales a diésel, sin embargo, se espera una reducción significativa de los costos de ambas tecnologías para el año 2030, en donde, los camiones a pila de hidrógeno tengan un TCO hasta un 8% menor al de la tecnología convencional a diésel, levemente más baja que los camiones de batería eléctricos.

Cabe señalar que este análisis se hace bajo un contexto de desarrollo de una red de 270 estaciones de carga proyectadas entre República Checa, Hungría, Eslovaquia y Polonia que permitirán proveer la infraestructura necesaria de carga para el despliegue de 10.000 camiones de carga en la región.

2.5.7.1.2 Caso Camión de Carga de la Compañía Dachser en Italia - Alemania

El caso de estudio se sitúa en una ruta de larga distancia que totaliza 757 km considerando dos rutas entre las ciudades de Bolzano en Italia y Munich en Alemania.

Los camiones de carga utilizados son de 3 ejes y de 27 toneladas los cuales transportan cargas palletizadas de volumen relativamente fijo, pero peso variable.

El caso de estudio contempla una flota de 10 camiones con un kilometraje anual de aproximadamente 180.000 km por camión, ocasionando un consumo de 0,071 kg/km de hidrógeno y de 537 kg/día considerando toda la flota de camiones, que a su vez generan un ahorro de emisiones de 175 ton de CO₂ al año.

La siguiente gráfica muestra los Costos Totales de Propiedad (TCO) comparando tecnologías convencionales a diésel, 3 alternativas de camiones a pila de combustible a hidrógeno y camiones con baterías eléctricas (BEV) tanto para un escenario proyectado a corto plazo (2023), considerando que el estudio se publicó en 2020; así como a mediano plazo (2030).

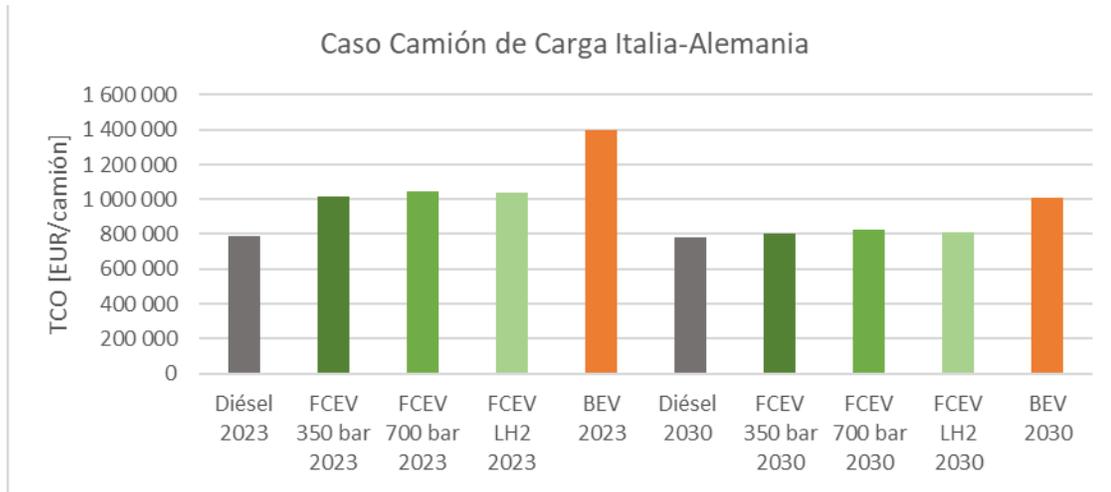


Figura 2-26: Costos Totales de Propiedad (TCO) para caso de estudio de flota de camiones en Italia-Alemania

Fuente: Elaboración propia en base a [5]

Se aprecia que en la actualidad el TCO de los camiones a hidrógeno supera en un 29% a los camiones convencionales a diésel, pero a su vez es un 38% más económico que un camión a batería eléctrica. Esto se debe a los altos costos y reducción de carga útil transportada en los camiones debido al gran tamaño y peso de las baterías eléctricas requeridas para un uso de este tipo. Por otra parte, se evidencia que los camiones a baterías no ofrecen la flexibilidad adecuada para su carga considerando el doble turno en el uso de los camiones.

De todos modos, proyectando el análisis al año 2030, se ve que el TCO de los FCEV será prácticamente equivalente, pero no menor, a la tecnología convencional a diésel. Esto se debe al uso intensivo diario que requiere un tren motriz más grande (módulos de pilas de combustibles y tanque de hidrógeno) que incrementan el costo de los vehículos. Aunque este análisis considera el diseño de un vehículo de tamaño suficiente para no contemplar recargas de hidrógeno dentro del trayecto diario, que podría reducir los costos asociados al tren matriz.

2.5.7.1.3 Caso Camión de Carga de la Compañía DHL en Reino Unido

El caso de estudio se sitúa en rutas logísticas variables de múltiples destinos entre Hatfield y Londres en Reino Unido que totalizan aproximadamente 200 km diarios operada en uno o dos turnos.

Los camiones de carga utilizados son de 2 ejes y de 18 toneladas los cuales transportan cargas variables de volumen relativamente fijo, con peso en torno a las 4 toneladas.

El caso de estudio contempla una flota de 6 camiones con un kilometraje anual de aproximadamente 75.000 km ocasionando un consumo de 0,066 kg/km de hidrógeno y de 80 kg/día considerando toda la flota de camiones, que a su vez generan un ahorro de emisiones de 66 ton de CO₂ al año.

La siguiente gráfica muestra los Costos Totales de Propiedad (TCO) comparando tecnologías convencionales a diésel, 3 alternativas de camiones a pila de combustible a hidrógeno y camiones con baterías eléctricas (BEV) tanto para un escenario proyectado a corto plazo (2023), considerando que el estudio se publicó en 2020; así como a mediano plazo (2030).

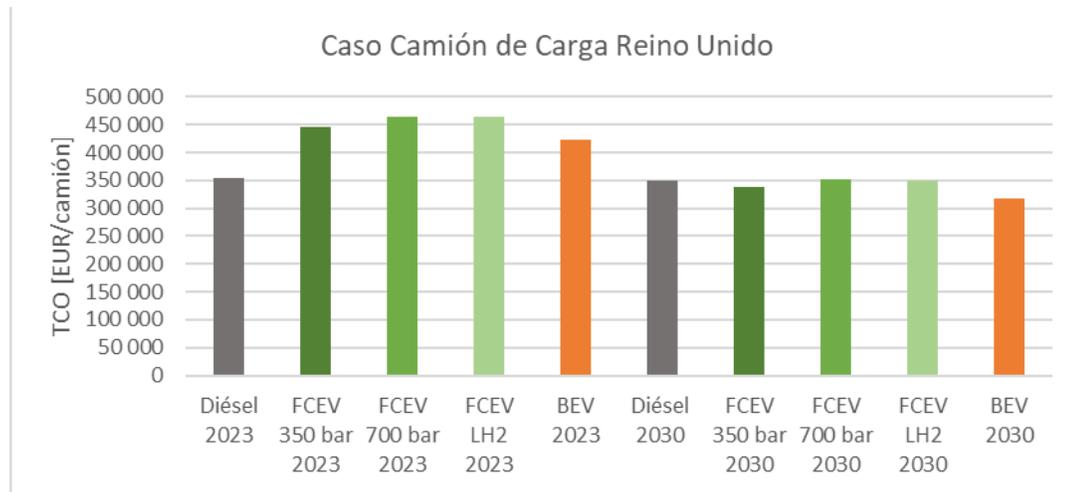


Figura 2-27: Costos Totales de Propiedad (TCO) para caso de estudio de flota de camiones en Inglaterra

Fuente: Elaboración propia en base a [5]

Se aprecia que al año 2023 el TCO de los camiones a hidrógeno supera en un 26% a los camiones convencionales a diésel y es un 6% más alto que para un camión a batería eléctrica. Para el año 2030, se proyecta que los FCEV serán más costo-eficientes que los camiones convencionales a diésel aproximadamente en un 3%, sin embargo, serán levemente menos competitivos que las flotas de camiones a batería eléctrica. Esto se debe principalmente a las distancias más cortas recorridas y los tiempos disponibles para recargas eléctricas de la flota.

2.5.7.2 Buses de Transporte

2.5.7.2.1 Caso Flota de Buses de Transporte Público en New Jersey

El caso de estudio se sitúa en New Jersey, Estados Unidos, en donde se realiza un análisis en dos escenarios: un primero actual con una flota de 5 buses y un trayecto de 200 millas (322 km); y un segundo escenario a 2028 con una flota de 100 FCEBs con iguales trayectos.

Para el primer escenario actual en 2023, se presentan 5 escenarios de análisis de TCO: (1) electrolizador on-site con energía de la red; (2) compra off-site de hidrógeno verde gaseoso; (3) compra off-site de hidrógeno azul gaseoso; (4) compra off-site de hidrógeno gris gaseoso; (5) bus convencional (ICE) a diésel.

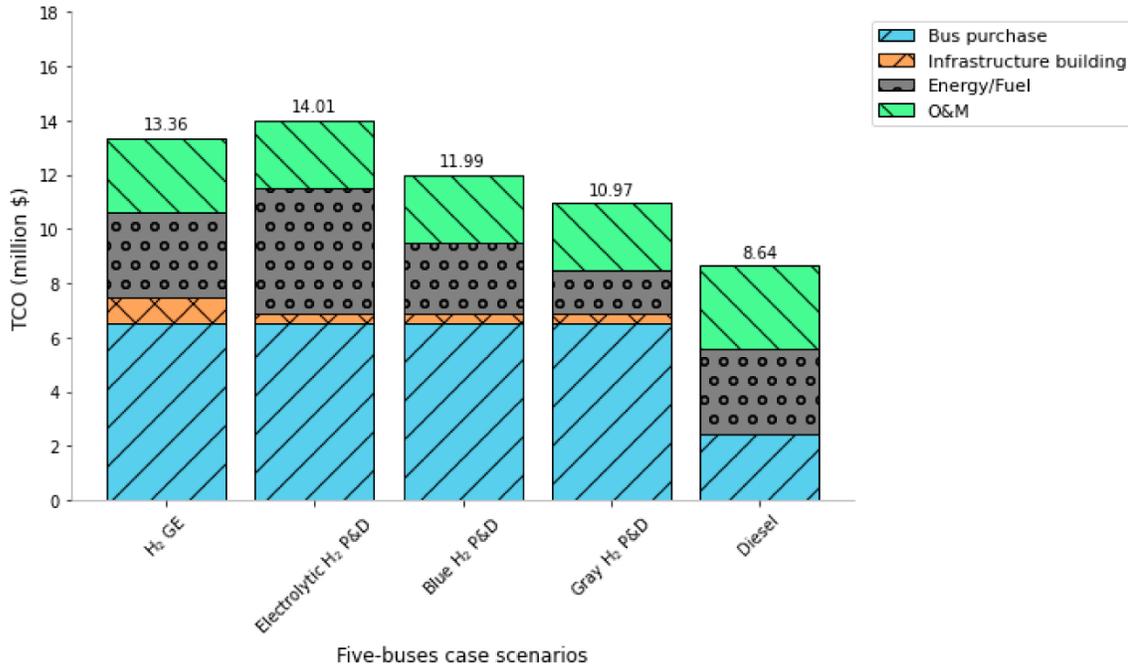


Figura 2-28: TCO para caso estudio de flota de 5 buses en New Jersey, Estados Unidos (2023)

Fuente: [36]

Se aprecia que el hidrógeno verde (electrolítico) posee el TCO más alto entre las alternativas, por encima de las alternativas de H₂ azul y gris y todos sobre el TCO del diésel convencional. La diferencia entre el hidrógeno y el diésel convencional supera el 60%.

La siguiente gráfica muestra la proyección del TCO para el segundo escenario con una flota mayor de buses en operación en el año 2028 e incorporando como alternativas dos casos de producción de hidrógeno on-site mediante una planta de reformado de vapor de metano (SMR, de sus siglas en inglés) con o sin captura de CO₂, lo que viene a significar en producción de hidrógeno azul o gris, respectivamente.

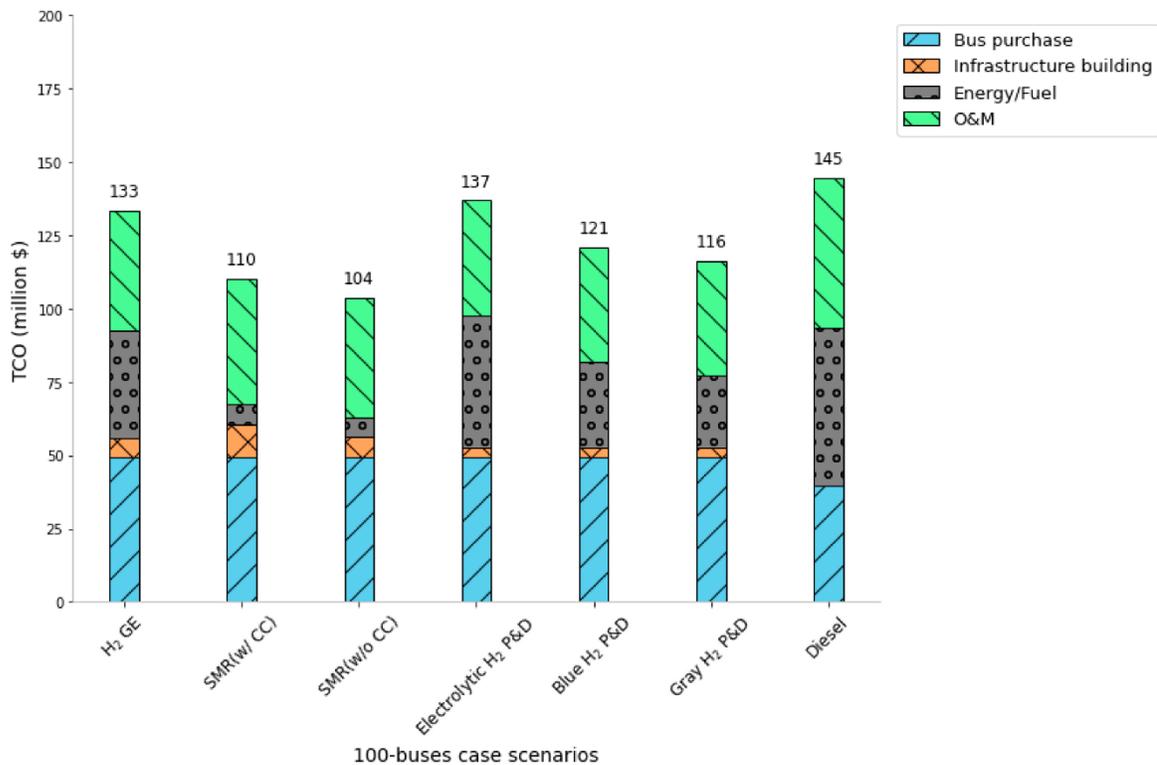


Figura 2-29: TCO para caso estudio de flota de 100 buses en New Jersey, Estados Unidos (2028)

Fuente: [36]

Los resultados muestran que el hidrógeno producido en el sitio mediante SMR y con secuestro de CO₂, que lo haría azul sin emisiones, tendría un TCO de 110 millones de USD, bastante por debajo de los 137 millones del hidrógeno electrolítico (verde) y aún más bajo que los 145 millones del diésel convencional.

2.5.7.2.2 Caso Flota de Buses en Austria

El caso de estudio se sitúa en la localidad de Burgenland con una flota de buses urbanos indeterminada que totalizan aproximadamente 45.000 km anuales por bus.

Los buses son de tecnología de pila de combustible (FCEB) con una eficiencia entre 51-58% con una potencia máxima de 100 kW y un tanque de hidrógeno de 45 kg a 350 bar.

El caso de estudio considera un consumo de 0,09 kg/km de hidrógeno, en comparación con 0,35 litros/km del diésel convencional. Y con costos de 9,5 €/kg H₂ y 1,21 €/l Diesel.

La siguiente gráfica muestra los Costos Totales de Uso (TCU) utilizado en la metodología del caso de estudio, comparando el uso de hidrógeno verde a partir de una granja eólica (caso base) y una serie de escenarios de sensibilización de variables que permitan determinar su influencia en el desempeño de los FCEB relativos a un bus convencional a diésel.

Cabe señalar que en este estudio de referencia se utiliza el concepto de TCU (*Total Cost of Use*), el cual contempla el costo de inversión, el costo de mantenimiento anual y el costo asociado al combustible utilizado anualmente. Y no contempla otros costos indirectos que si se incluyen en el TCO (*Total Cost of Ownership*), además de los

costos de disposición o reciclaje final (al final de su vida útil). Por otra parte, en el TCU se lleva a un valor de uso anual, a diferencia del TCO que se analiza como un costo total a lo largo de la vida útil de la inversión.

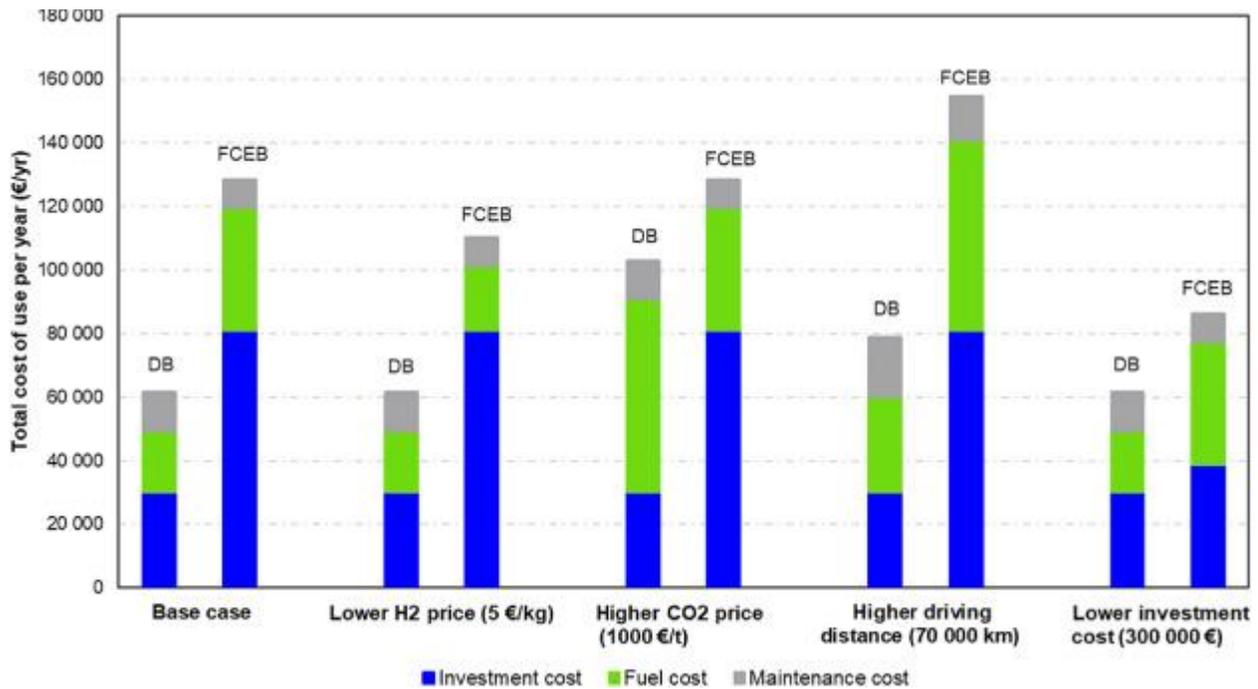


Figura 2-30: Costos Totales de Uso (TCU) para caso de estudio de flota de buses en Austria

Fuente: [37]

Se puede observar de la figura que, a día de hoy, el TCU de los FCEB a hidrógeno son considerablemente más altos que los buses convencionales a hidrógeno. Incluso variando diferentes parámetros del análisis como una reducción del precio del hidrógeno, incrementando el costo de las emisiones de CO₂, aumentando las distancias de viaje y reduciendo el costo de inversión. Sin embargo, si es posible observar que el costo de inversión de los buses es probablemente la variable más significativa, que sumado a una baja en el precio del H₂ y/o un aumento del costo asociado a las emisiones de CO₂ podrían hacer la alternativa competitiva con el diésel convencional.

2.5.8 Incentivos y Políticas Públicas

Norteamérica, Europa y Asia han introducido numerosos incentivos y políticas públicas para incentivar el uso y adopción del hidrógeno como un combustible clave para la transición energética.

Los enfoques de las políticas tienen relación con metas de descarbonización, así como de soporte para soluciones bajas en emisiones, en donde el hidrógeno aparece como un actor relevante. Se describe a continuación un resumen de los incentivos y políticas adoptadas tanto en Estados Unidos, China como en la Unión Europea.

2.5.8.1 Estados Unidos

Estados Unidos posee su eje central de fomento al hidrógeno verde basado en la “Estrategia y Hoja de Ruta para el Hidrógeno Limpio” [38], lanzado en junio del año 2023, el cual establece objetivos claros para la producción,

transporte y uso del Hidrógeno limpio o verde, haciendo énfasis en su rol para la transición energética y la competitividad del país.

Así también Estados Unidos ha lanzado una serie de incentivos para el desarrollo del Hidrógeno, los que se pueden resumir en:

- **Inflation Reduction Act (IRA):** En donde se establecen una serie de créditos fiscales para vehículos a hidrógeno que contempla por ejemplo hasta 40.000 USD para la compra de camiones pesados a H₂. Y la generación de subsidios para la instalación de estaciones de carga, enfocándose en rutas claves de transporte.
- **Bipartisan Infrastructure Law (BIL):** Iniciativa en donde se han destinado 9.500 millones de USD para la creación de centros regionales de hidrógeno (Hydrogen Hubs) que estarán ubicados estratégicamente cerca de corredores de transporte y áreas industriales clave. Estos centros permitirán abastecer de flotas de transporte pesado como camiones de larga distancia como autobuses de pasajeros. Así como facilitar el desarrollo de redes de estaciones de carga.
- **Fomento al I+D:** Se han creado fondos por parte del departamento de energía (DOE) para incentivar la investigación y desarrollo que permitan mejorar la eficiencia y reducción de costo de los motores de combustión interna de hidrógeno, del desarrollo de pilas de combustible de nueva generación utilizadas en el transporte pesado y para innovar en los sistemas de almacenamiento de hidrógeno a alta presión que permitan maximizar la autonomía de los vehículos.
- **Estándares de Emisión Cero:** California está liderando la implementación de estándares que obligan el uso de tecnologías de emisión cero en flotas comerciales como la regulación “[Advanced Clean Trucks \(ACT\)](#)” que incorpora exigencias a los fabricantes de vehículos a aumentar progresivamente la proporción de vehículos de cero emisiones a partir del año 2024.

2.5.8.2 China

China es hoy el mayor productor de hidrógeno del mundo, suministrando en el año 2023 un total de 34,68 millones de toneladas métricas. Sin embargo, de toda esta producción solo un 1,2% se generó a partir de electrólisis de agua e incluso, solo un 0,1% con electrólisis alimentada con energías renovables. El restante 98,8% corresponde a hidrógeno gris proveniente del carbón, del gas natural o como subproducto industrial [39].

En los últimos años, China ha impulsado una estrategia ambiciosa para liderar el mercado global de hidrógeno verde con un foco importante en el desarrollo del sector transporte. En el año 2022 publicó el “**Plan de Desarrollo de la Industria del Hidrógeno (2021-2035)**”, cuyo objetivo final es contribuir para alcanzar la carbono-neutralidad del país para el año 2060. Su enfoque en transporte se centra en la promoción de vehículos pesados impulsados por hidrógeno y en el desarrollo de una red amplia de infraestructura de estaciones de carga que permitan hacer viable el desarrollo del sector.

Dentro de las estrategias y metas principales establecidas en este plan se han considerado [40]:

- **Aumento de la flota de vehículos a hidrógeno:** Se busca alcanzar los 50.000 vehículos de pila de combustible para 2025, principalmente asociado a camiones de carga y buses urbanos. La cifra se espera que aumente hasta 1.000.000 para el año 2035.
- **Desarrollo de infraestructura pública:** Se han desarrollado numerosos sistemas de carga de hidrógeno en una serie de regiones clave como Beijing, Shangai y Guangdong y se está construyendo el primer gasoducto de hidrógeno de larga distancia entre Ulanqab y Beijing. Así también busca apoyar la

reconversión de estaciones de servicio existentes convencionales para adaptarse a las necesidades de los FCEVs.

- **Incentivos financieros:** El gobierno chino ha destinado aproximadamente 41.000 millones de USD en subsidios para la fabricación y pruebas de vehículos a hidrógeno, además para la reconversión de vehículos convencionales a hidrógeno.
- **Producción y almacenamiento:** Aumento de la producción de hidrógeno a partir de energías renovables de 100.000 a 200.000 tm/año para 2025.

2.5.8.3 Europa

La Unión Europea ha estado trabajando en una serie de políticas públicas que buscan alcanzar la descarbonización y la transición energética como el “Green Deal” que busca alcanzar la neutralidad climática para el 2050 y el “Fit for 55” que corresponde a un paquete de medidas cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para el año 2030.

En torno a estas políticas más amplias, en el año 2020 la Comisión Europea publica la “**Estrategia Europea de Hidrógeno**” y la “**Estrategia Europea para la Integración de Sistemas Energéticos**” y se conforma la “**European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A)**” para contribuir a la implementación de la estrategia de hidrógeno [41].

La estrategia de hidrógeno busca apoyar la descarbonización de todos los sectores, incluyendo al sector transporte, mediante inversiones, regulación, creación de mercados e investigación y desarrollo. Establece 20 acciones relevantes para el desarrollo de una economía del hidrógeno en Europa y entre sus objetivos principales está la producción de 10 millones de toneladas de hidrógeno verde para el año 2030 y priorizar el uso de hidrógeno verde en vehículos pesados como es el caso de camiones, buses y trenes, además del transporte marítimo y aéreo.

Entre las diferentes metas e incentivos que trae esta estrategia, se pueden destacar [3]:

- **Metas vinculantes del RED III:** La “Revised Renewable Energy Directive” (RED III) establece que para 2030, los estados miembros deben garantizar que al menos el 29% de la energía utilizada en el sector transporte provenga de fuentes renovables o, alternativamente, lograr una reducción del 14,5% en la intensidad de los gases de efecto invernadero en comparación con los del año 2020. Así también se incluye la meta de que para el 2025 al menos el 1% de la energía en transporte provenga de combustibles renovables de origen no biológico como el hidrógeno. Esta meta aumenta a un 5,5% para el año 2030, con un mínimo de un 1% de hidrógeno verde o combustibles sintéticos derivados del hidrógeno.
- **Paquete de Descarbonización de Gas e Hidrógeno 2024:** Se crea un marco que regula la infraestructura dedicada al hidrógeno, permitiendo la adaptación de redes existentes de gas natural para su uso con hidrógeno. Además de facilitar la creación de un mercado de hidrógeno competitivo en el continente, clave para la necesidad de reducción de costos requerida.
- **Fondos IPCEI (Inversiones y Proyectos Importantes de Interés Común):** Se crean los IPCEI Hy2Tech (2022), Hy2Use (2023) y Hy2Move (2024) para financiar proyectos en toda la cadena de valor del hidrógeno, con buenos focos en infraestructura y tecnologías de innovación para el transporte pesado.
- **Banco Europeo de Hidrógeno:** Se establece en el año 2023 como un mecanismo financiero para impulsar inversiones en la tecnología.

2.6 Contexto Nacional

En los últimos años Chile ha incorporado una serie de políticas públicas, programas y planes para fomentar el desarrollo del hidrógeno verde, con el fin de buscar destacar como un líder regional de esta tecnología.

2.6.1 Estrategia Nacional y Plan de Acción de Hidrógeno Verde

En el año 2020 se define la visión del país para convertirse en un exportador líder de H2V y sus derivados para el año 2030. Eso se plasma en la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde [42] que plantea tres etapas:

- 1) **Etapla 2020-2025: Activación de la industria doméstica y desarrollo de la exportación.** Se busca activar 6 aplicaciones prioritarias en Chile para construir un mercado local.
 - a) Uso en refinerías
 - b) Amoníaco doméstico
 - c) Camiones mineros (CAEX)
 - d) Camiones pesados de ruta
 - e) Buses de larga autonomía
 - f) Inyección en redes de gas (hasta 20%)
- 2) **Etapla 2025-2030: Escalamiento para conquistar mercados globales.** Se busca apalancar la experiencia local para entrar con fuerza en mercados internacionales. Inicialmente, mediante una industria de producción y exportación de amoníaco verde, para continuar con acuerdos para acelerar el desarrollo de la exportación de hidrógeno.
- 3) **Etapla 2030+: Escalamiento para conquistar mercados globales.** Se busca explotar las sinergias y economías de escala para transformarse en un proveedor global de energéticos limpios.

Así también la estrategia define las siguientes metas a trabajar en estos 10 años:

1. Ser el país con mayor cantidad de inversión en H2V de Latinoamérica para 2025.
2. Alcanzar un costo de producción de H2V inferior a 1,5 USD/kg para el año 2030.
3. Desarrollar 5 GW de capacidad de electrólisis para 2025 y 25 GW para 2030.
4. Ser un líder exportador global de hidrógeno verde y derivados con montos sobre los 2,5 billones de USD al año.

La estrategia nacional de H2V, plantea desde un inicio la prioridad de desarrollar una industria doméstica relevante para el hidrógeno, en donde los camiones de carga mineros y de ruta, además de los buses de larga autonomía son aplicaciones claves y prioritarias a trabajar y desarrollar.

Posteriormente, en abril de 2024, se publica el “**Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030**” [43] el cual incorpora 81 medidas y 360 acciones específicas para desarrollar el H2V en el país.

Para la primera ventana temporal (2023-2026), el plan se enfoca en establecer las condiciones iniciales para la adopción del hidrógeno verde en el transporte, incluyendo el desarrollo de normativas y estímulos para proyectos piloto en transporte pesado y público. Posteriormente, en la segunda ventana (2026-2030), se busca consolidar la infraestructura y ampliar el uso del H2V en flotas comerciales, buses interurbanos y camiones de carga.

Como líneas de acción específicas para el sector transporte, solo se observan las siguientes dos acciones específicas:

- Acción 28 (2024-2030): Lanzar e implementar el plan de trabajo de regulaciones habilitantes para la industria del hidrógeno y derivados. En donde se enfocará en regulaciones para estaciones surtidoras de hidrógeno, transporte de cargas en sus distintos modos, entre otras.
- Acción 50 (2024-2025): Desarrollar planta de hidrógeno verde en Cabo Negro, Magallanes, donde se señala como hito que en 2026 se hará entrega de combustible H2V para uso en vehículos de uso interno de ENAP.
- Acción 56 (2024-2025): Implementación de un proyecto piloto de un bus a hidrógeno en el transporte público para evaluar técnica, económica y socialmente el despliegue de esta tecnología

2.6.2 Acciones Desarrolladas o en Curso

En los últimos años se han ido trabajando estudios y acciones diversas en el país para avanzar en el desarrollo del H2V. En particular, ligado al sector transporte de carga y de buses de pasajeros, cabe destacar algunos que se resumen a continuación.

2.6.2.1 Estudios realizados

A continuación, se presentan tres estudios realizados en Chile relacionados a la viabilidad técnica y económica del uso de hidrógeno como combustible para medios de transporte pesados en el país.

2.6.2.1.1 Evaluación técnico-económica de flota de buses a hidrógeno en el sistema RED

El estudio "Evaluación Técnico-Económica de la Implementación de una Flota de Buses de Hidrógeno en el Sistema de Transporte Metropolitano RED" [44], realizado por la Pontificia Universidad Católica de Chile, tuvo como objetivo demostrar la factibilidad técnica y económica de operar buses impulsados por hidrógeno verde en Santiago.

Se analizaron veinte rutas específicas del sistema de transporte RED, determinando que los buses de hidrógeno disponibles comercialmente cumplen con los requisitos de potencia, autonomía y capacidad necesarios para operar en la ciudad y suficiente para cubrir un día completo de operación sin recargas durante el servicio.

El estudio ha estimado que el punto de equilibrio en relación al costo total de propiedad (TCO) de los buses de hidrógeno (FCV) en comparación con buses diésel convencionales (ICE) y eléctricos con batería (BEV) podría alcanzarse en torno al año 2026. Esto, aunque es posible que no se alcance tan rápidamente, si nos permite visualizar el posicionamiento del hidrógeno como una opción competitiva a mediano plazo en el transporte público, observándose su alta competitividad futura, en especial en trayectos largos y recorridos con operación continua 24/7.

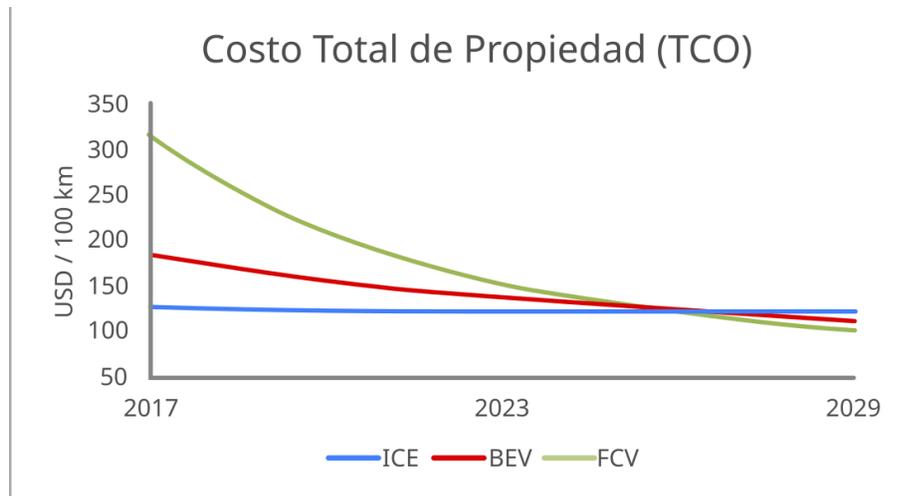


Figura 2-31: Costo Totales de Propiedad (TCO) comparativo para flota de buses RED en Santiago

Fuente: [44]

Además, el estudio ha identificado que el uso de buses de hidrógeno contribuiría significativamente a la descarbonización del transporte público, reduciendo tanto las emisiones de CO₂ como la contaminación acústica en la ciudad. Destacando a su vez, el componente educativo y de aceptación social, ya que la implementación de esta tecnología permitirá generar visibilidad y fomentará la interacción ciudadana con las energías limpias.

Finalmente, el estudio destaca la importancia de desarrollar la infraestructura adecuada de carga para garantizar la viabilidad operativa de los buses.

2.6.2.1.2 Evaluación técnico-económica de bus a hidrógeno en el sistema RED

El estudio "Evaluación técnico-económica implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano" [45], tuvo como objetivo analizar la implementación de un bus de hidrógeno en tres recorridos distintos: 506, 104 y 424, cada cual con propiedades distintas respecto a su distancia como también a la pendiente promedio de su trayecto.

Del análisis realizado se observa que el rendimiento de los buses a hidrógeno en estos recorridos se encuentra dentro de los valores promedios observados de casos de estudio en otros países, alcanzándose rendimientos medios de 8 a 9 kg/100km con variaciones de entre los 6 hasta 15 kg/100km. Así también, se observó que existen en el mercado buses a hidrógeno que cumplen con los requerimientos de potencia y autonomía necesarios por lo recorridos estudiados. Por otra parte, se determinó que, en la mayoría de los casos, la velocidad media del servicio no se ve afectada, ya que los motores eléctricos de los buses de hidrógeno ofrecen potencia suficiente para mantener el rendimiento actual. Y finalmente, se observó que los buses de hidrógeno tienen una ventaja significativa en tiempos de recarga (10-20 minutos) en comparación con los buses eléctricos de batería, que requieren entre 2 y 3 horas. Esto permite que los buses de hidrógeno estén operativos hasta un 28% más de tiempo, mejorando su disponibilidad en ruta. Sin embargo, también se identificó que la preferencia entre buses eléctricos a batería o de hidrógeno no es algo trivial ya que, si los tiempos de carga no son un tema crítico para el recorrido, entonces la ventaja competitiva no sería tan relevante.

2.6.2.1.3 Estudio de esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica del hidrógeno.

El "Estudio para definir esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de Hidrógeno Verde en Chile"

[46], trabajó en analizar cómo estructurar esquemas financieros que permitan escalar el hidrógeno verde como vector energético clave en Chile.

El informe destaca varias herramientas para facilitar la inversión en hidrógeno verde, tales como:

- Garantías de inversión y créditos concesionales para mitigar riesgos.
- Fondos de desarrollo público-privado orientados a financiar proyectos piloto en sectores estratégicos como minería, transporte y exportación de amoníaco verde.
- Mecanismos basados en carbono como los *Internationally Transferred Mitigation Outcomes* (ITMOs), derivados del Artículo 6 del Acuerdo de París, que podrían generar financiamiento adicional para proyectos que reduzcan emisiones de gases de efecto invernadero

Además, el estudio identificó una serie de sectores con alto potencial de adopción del hidrógeno verde, donde destacan asociados al sector transporte los siguientes:

- Buses interurbanos y camiones en ruta
- Camiones y maquinaria en operaciones mineras
- Combustible verde para centros logísticos

Así para estas aplicaciones se analizaron diferentes esquemas de financiamiento interesantes para acelerar la adopción del hidrógeno en cada una de ellas.

2.6.2.2 Iniciativas de pilotos a nivel nacional

A continuación, se presentan tres casos piloto desarrollados a nivel nacional en donde se utiliza hidrógeno como combustible de vehículos de transporte pesado y carga.

2.6.2.2.1 Caso Piloto de Bus a Hidrógeno fabricado en Chile

En 2025, se lanzará el primer bus a hidrógeno verde fabricado localmente en Chile. Esta iniciativa ha sido liderada por Anglo American, Colbún y Reborn Electric Motors, con el apoyo de CORFO. Este proyecto busca contribuir a la descarbonización del transporte y fomentar la movilidad sostenible en el país.

Las características del proyecto se pueden resumir en:

- **Presupuesto:** US\$ 755 mil, financiado por Anglo American, Colbún y CORFO en partes iguales.
- **Fabricación:** Liderada por Reborn Electric Motors, una *startup* chilena especializada en tecnologías limpias.
- **Capacidad del bus:** 24 pasajeros, autonomía de hasta 450 km y velocidad máxima de 90 km/h.
- **Infraestructura:** Se instalará una estación de carga piloto en las instalaciones de Reborn, pero el bus será compatible con otras estaciones de hidrógeno.

El proyecto contempla la realización de pruebas operativas en entornos urbanos e industriales, como rutas de transporte público y caminos mineros. Y se realizará una colaboración activa con municipalidades y centros de estudio para evaluar la viabilidad técnica y fomentar la transferencia del conocimiento adquirido con el proyecto a la comunidad.

Anglo American considera esta iniciativa un paso hacia la adopción masiva del hidrógeno verde en aplicaciones industriales, incluyendo camiones mineros y otras soluciones energéticas para descarbonizar la minería en el país.



Figura 2-32: Modelo de bus a hidrógeno de fabricación chilena

Fuente: [47]

2.6.2.2.2 Caso Piloto de Camión a Hidrógeno en Walmart Chile

Walmart Chile ha planteado un compromiso con una transformación sostenible, comprometiéndose a que el 10% de sus trayectos logísticos sean de bajas emisiones para finales de 2024, y proyecta alcanzar un 40% para 2029. Esto forma parte de su misión global de convertirse en una empresa regenerativa para 2040.

En consideración a esta política corporativa ha trabajado en la incorporación de un camión a hidrógeno verde, en colaboración con Marval Clean Logistics, con las siguientes características:

- **Autonomía:** 750 km, con capacidad de carga de hasta 49 toneladas, similar a un camión diésel, pero sin emisiones contaminantes.
- **Ruido:** Inferior a 20 decibeles.
- **Tiempo de recarga:** Entre 20 minutos y 1 hora.

La implementación de este camión va de la mano del desarrollo de una planta de producción de hidrógeno verde ya inaugurada el año 2023 en el centro de distribución de Quilicura de la compañía. Esta planta, desarrollada en conjunto con ENGIE, genera 240 kg de H₂V por día y evita la emisión de 1.600 toneladas de CO₂ al año.



Figura 2-33: Camión a Hidrógeno piloto de Walmart Chile

Fuente: [48]

2.6.2.2.3 Caso Piloto de Camión a Hidrógeno de Sotraser Chile

Sotraser, empresa líder en descarbonización del transporte de carga en Chile, ha incorporado el primer camión a hidrógeno del país a su flota de cero emisiones. Se trata del modelo Foton E AUMAN 2549 6X4, adquirido a través de Andes Motors.

Las características técnicas de este camión a hidrógeno son:

- **Configuración:** Tractor 6x4
- **Torque máximo:** 2100 Nm
- **Tara:** 11 toneladas
- **Peso bruto combinado:** Hasta 49 toneladas
- **Potencia máxima:** 482 hp
- **Batería LMO:** 53 kWh
- **Almacenaje de:** H₂: 6 cilindros de 385 litros a 35 MPa
- **Autonomía:** Hasta 670 km



Figura 2-34: Camión a Hidrógeno piloto de Sotraser

Fuente: [49]

2.6.2.2.4 Caso Estación de Carga de Hidrógeno COPEC-Linde

La filial COPEC-Voltex de la empresa COPEC presentó, en octubre de 2023, la primera estación de carga de hidrógeno (o “hidrolinera”) del país. La estación se encuentra ubicada en las dependencias de la empresa Buses Hualpén, en la comuna de Pudahuel, en Santiago de Chile y se encontrará en capacidad de suministrar hidrógeno gaseoso a vehículos marca Toyota, modelo Mirai. El sistema de transferencia del hidrógeno al vehículo es por diferencias de presión, desde 150 bar que es la presión a la que se encuentra el hidrógeno en los cilindros de la estación, hasta los 35 bar a los que trabaja el vehículo.



Figura 2-35: Estación de carga de hidrógeno de COPEC-Linde en Pudahuel

Fuente: [50]

3 Levantamiento de Antecedentes de Fabricantes y Proveedores

3.1 Buses de Transporte de Pasajeros

3.1.1 Buses Actualmente en Operación

La base de datos de Plantas de Revisiones Técnicas (PRT) del año 2023 registra un total de 62.104 vehículos del tipo bus. Este total es coherente en orden de magnitud con la base de datos de permisos de circulación publicada por el INE, donde el total de vehículos registrados en la categoría de buses para el 2023 es de 61.035.

Tabla 3-1: Buses PRT 2023 según tipo de vehículo

Cod	Tipo Vehículo	Total
101	BUS	44.469
102	BUS PULLMAN	9.253
103	BUS 2 PISOS	69
105	BUS LIVIANO (SOLO SERVICIO URBANO)	1.648
106	BUS MEDIANO (SOLO SERVICIO URBANO)	232
107	BUS PESADO (SOLO SERVICIO URBANO)	174
108	BUS CLASE A1 < 9 m	301
109	BUS CLASE A2 >= 9 m y < 11 m	77
110	BUS CLASE B >= 11 m y < 14 m	3.570
111	BUS CLASE C >= 14 m y < 18 m	382
210	BUS CLASE A >= 8 m y < 11 m	43
211	BUS CLASE B1 >= 11 m y < 12 m	443
212	BUS CLASE B2 >= 12 m y < 14 m	733
213	BUS CLASE C1 >= 14 m y < 16,5 m	1
214	BUS CLASE C2 >= 16,5 m y < 18 m	709
215	BUS CLASE D >= 10 m y < 13 m Bus de dos pisos	-
	Total	62.104

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

Tabla 3-2: Buses PRT 2023 según tipo de servicio

	Tipo Servicio	Total	Total
Debiesen estar en el RNTP	URBANO LICITADO [A1] [A2]	12.886	33.237
	RURAL NO LICITADO [A1] [A2]	9.218	
	INTERURBANO [A1] [A2]	3.801	
	AEROPUERTO [A1] [A2]	106	
	URBANO NO LICITADO [A1] [A2]	4.974	
	RURAL LICITADO [A1] [A2]	2.228	
	TAXI COLECTIVO RURAL [A2]	1	
	PERIFERICO RURAL SOLO R.M. [A1] [A2]	23	
	NO CORRESPONDE	32	28.867

	Tipo Servicio	Total	Total
No debiesen estar en RNTP	FLETES [A2] [B]	2	
	PRIVADO-PARTICULAR [A1] [A2] [B]	8.178	
	TURISMO [A1] [A2]	523	
	ESCOLAR [A1] [A2]	5.853	
	EXPRESO [A1]	2	
	PRIVADO - REMUNERADO [A1] [A2]	14.252	
	OTRO	25	
	Total	62.104	62.104

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

Por otro lado, la Secretaría de Transportes mantiene un registro de todos los buses en operación para el transporte público a nivel nacional (Registro Nacional de Transporte Público, RNTP), con un total de 33.719 vehículos. Tal como se muestra en la tabla anterior, aproximadamente la mitad de los vehículos registrados en las PRT deberían estar también en el RNTP, lo que indica que ambas fuentes de información son coherentes en cuanto a su orden de magnitud.

Los buses registrados en el RNTP se clasifican según el tipo de servicio que prestan:

- Bus interurbano corriente:** Servicio prestado por lo general por buses de tipo Pullman. El chasis más común utilizado es la familia O500 de Mercedes Benz, con 1.182 vehículos registrados en 2023, 30% del total, el mismo utilizado por los buses urbanos de tipo B. Al año 2023 existían 3.935 vehículos registrados, de ellos más del 65% corresponde a vehículos Euro 5, seguidos de más de una cuarta parte que corresponde a vehículos Euro 2. Se encuentran registrados principalmente en la Región Metropolitana, realizando rutas que conectan las diversas regiones del país entre sí.
- Bus rural corriente:** Servicio prestado principalmente por buses tipo A de transporte urbano, destacan los buses de la gama LO de Mercedes (4.689 vehículos, 40% del total) y los Mitsubishi FUSO (1.696 vehículos, 15% del total) que operan en gran parte del país. Sus rutas suelen conectar localidades pequeñas con las principales ciudades de la provincia o región. En la actualidad hay 11.600 vehículos registrados, distribuidos acorde a la población del país. Destacan 1.800 registros en el Maule, 1.595 en Valparaíso y 1.473 en Los Lagos. Más de un tercio de los vehículos son Euro 3, mientras que otro tercio son Euro 5. Es en esta categoría donde se encuentran los vehículos más antiguos en operación, donde más de un 10% de la flota se encuentra asimilada bajo la norma Euro 1 o su equivalente EPA. En la actualidad se dispone de un único vehículo cero emisiones eléctrico que presta servicios en la ruta Melipilla-Santiago.
- Bus urbano:** Servicios prestados principalmente por buses tipo A. Corresponden a todos los buses urbanos que prestan servicios en zonas administradas por DTPR (Dirección de Transporte Público Regional). En el registro cuentan 10.083 vehículos, en su mayoría de la serie LO de Mercedes Benz (6.929 vehículos, 69% del total). Más de la mitad de los vehículos siguen la norma Euro 3, mientras que algo menos de un tercio la norma Euro 5. La mayor parte de los registros se concentran en las regiones de Valparaíso y del Biobío, con algo más de 2.000 registros cada una.
- Bus urbano Transantiago:** Servicios prestados por buses tipo A, B, C y D. Consiste en todos los buses que operan en la actualidad en el marco del sistema RED y bajo el alero de DTPM (Directorio de Transporte Público Metropolitano). Se trata de 7.530 vehículos, todos en la Región Metropolitana, la mayor parte

de la familia O500 de Mercedes Benz (2.411 vehículos, 32% del total) y el modelo U12 de Foton (1.254 vehículos, 17% del total). Destaca cerca de un tercio de su flota eléctrica, otro tercio Euro 6 y el resto distribuyéndose equitativamente entre Euro 3 y Euro 5. Es el segmento donde mayor penetración se ha observado de vehículos cero emisiones.

A estas categorías existen otras que involucran vehículos pesados, pero con escasos registros:

- **Bus aeropuerto de recorrido fijo:** 97 vehículos, los más comunes son 62 vehículos XMQ6130, 31 vehículos XMQ6120 y 13 vehículos XMQ6110 todos de King Long.
- **Bus rural periférico:** 472 vehículos, los más comunes son los de la familia LO de Mercedes Benz con 304 vehículos, el 64% del total.
- **Bus aeropuerto de recorrido variable:** 2 vehículos, un Zhonthong LCK6850D y un Daewoo A100.

TIPOLOGÍA DE BUSES SEGÚN LONGITUD Y CARACTERÍSTICAS DE SU CARROCERÍA	Clases de buses, según DS 122/1991	Subclases de buses	Longitud en Metros (m)
	CLASE A ≥ 8 m y < 11 m	A1	< 9 m
		A2	≥ 9 m y < 11 m
	CLASE B ≥ 11 m y < 14 m	B1	≥ 11 m y < 12 m
		B2	≥ 12 m y < 14 m
		B2P	≥ 12 m y < 14 m, con puertas de servicio a ambos lados de su carrocería.
	CLASE C ≥ 14 m y < 18 m	C1	≥ 14 m y < 16,5 m
		C2	> 16,5 m y < 18 m
		C2P	> 16,5 m y < 18 m, con puertas de servicio a ambos lados de su carrocería.
	CLASE D ≥ 11 m y < 13 m de doble piso	D	≥ 11 m y < 13 m de doble piso

Figura 3-1: Tipología de Buses de Transporte Público Urbano

Fuente: DS 122/1991 del MTT

A continuación, se muestra el detalle del RNTP por Región:

Tabla 3-3: Flota de Buses RNTP a Nivel Nacional según Región

Regiones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Total
Bus interurbano corriente	220	19	0	439	187	486	165	247	142	274	0	65	1597	0	59	35	3.935
Bus rural corriente	332	67	210	574	1595	818	1800	1116	1117	1473	146	67	1152	598	35	500	11.600
Bus urbano corriente	366	994	85	719	2023	323	561	2293	895	861	0	70	0	336	259	298	10.083
Bus aeropuerto recorrido fijo	0	0	0	0	0	0	0	0	4	11	0	0	82	0	0	0	97
Bus rural periférico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.72	0	0	0	472

Bus urbano transantiago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.530	0	0	0	7.530
Bus aeropuerto recorrido variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Total	918	1080	295	1732	3805	1627	2526	3656	2158	2621	146	202	10.833	934	353	833	33.719

Fuente: Registro Nacional de Transporte Público Diciembre 2023

Y por norma de Emisiones homologado a nivel nacional:

Tabla 3-4: Flota de Buses RNTP a Nivel Nacional según Norma de Emisiones

Norma de Homologación o equivalente a norma EPA	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6	Euro 6 b	Euro 6 c	Eléctrico	no clasificado	Total
Bus interurbano corriente	0	924	304	0	2.377	17	0	0	0	313	3.935
Bus rural corriente	1.042	1.708	2.906	0	2.977	2	0	0	1	2.964	11.600
Bus urbano corriente	3	917	3.906	0	2.191	0	0	0	2	3.064	10.083
Bus aeropuerto recorrido fijo	0	1	0	0	3	0	0	0	0	93	97
Bus rural periférico	0	109	209	0	26	0	0	0	0	128	472
Bus urbano Transantiago	0	62	1.283	224	1.099	2.588	0	0	2.128	146	7.530
Bus aeropuerto recorrido variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2

Fuente: Elaboración propia a partir del Registro Nacional de Transporte Público Diciembre 2023

Cabe destacar que, en la elaboración de la clasificación según norma de emisiones, no se categorizaron la totalidad de los buses presentes en el registro, solo los modelos y fabricantes más frecuentes en operación, además de todos los fabricantes que han realizado el ingreso de vehículos eléctricos a diciembre de 2023. Es por ello que se informa de un conjunto no clasificado de buses, el cual está compuesto principalmente por modelos menos frecuentes o que están ingresados erróneamente en el registro.

Al respecto de los valores de los buses de transporte público, se observa que se dispone de los montos destinados desde las licitaciones del sistema RED 2023-2024 a la compra de buses para el sistema. Para el cálculo del valor del bus se asumió una tasa de interés del 0,5% intermensual, tasa en torno a la cual suele ubicarse la compra de buses.

Tabla 3-5: Precios buses Licitación de compra de flota sistema RED (USD)

Precios según tipo de bus en USD	Euro VI	Eléctrico
A	233.407	383.779
B	237.762	473.086
C	343.628	No licitado

Fuente: Elaboración propia a partir de contratos de Licitación sistema RED 2023-2024

Finalmente, al revisar las ventas de buses reportadas por la ANAC en la última década, se tienen los siguientes totales por año y por marca.

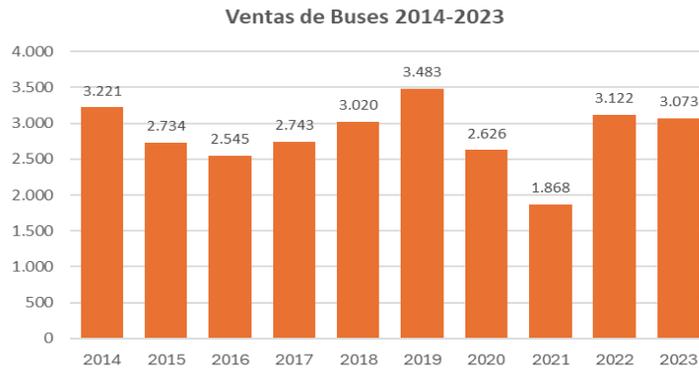


Figura 3-2: Totales de Ventas de Buses entre los años 2014 y 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de reportes ANAC

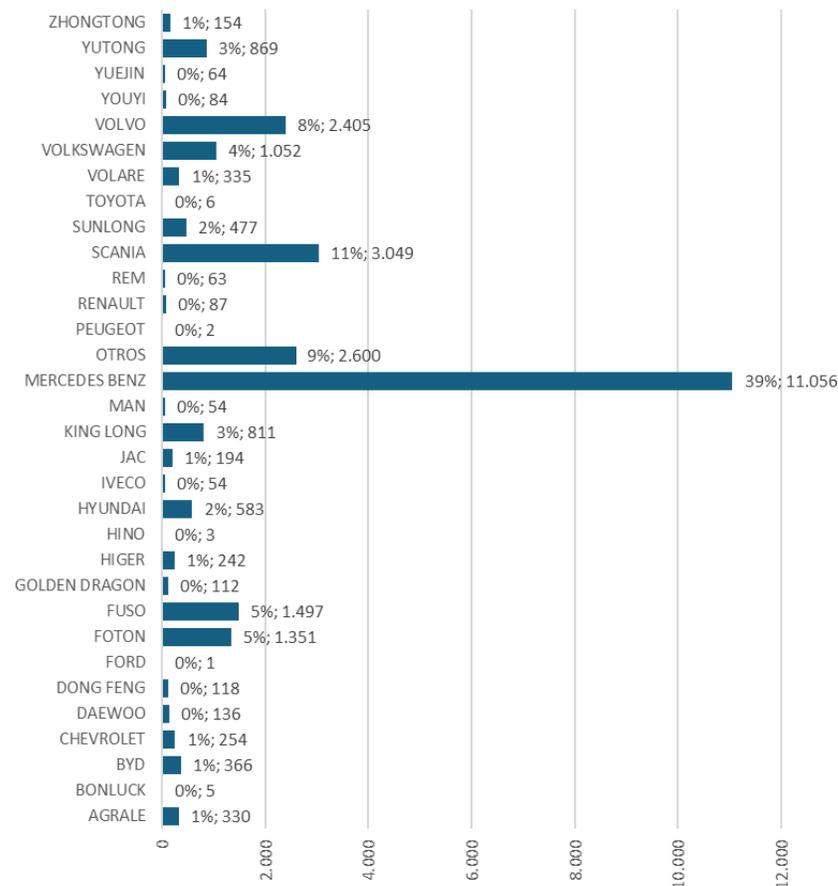


Figura 3-3: Total de Ventas de Buses entre los años 2014 y 2023 según Marca

Fuente: Elaboración propia a partir de reportes ANAC

Tal como se pudo observar en esta sección, anualmente se introducen al mercado chileno del orden de 3.000 buses nuevos y las ventas de la última década ha estado liderada por la marca Mercedes Benz. El total de buses existentes en el país al año 2023 supera los 60.000 vehículos, donde un poco más de la mitad (54%) prestan servicios de transporte público. De los buses que prestan servicios de transporte público, un 53%-54% lo hacen en servicios urbanos (17.613 según el RNTP y 17.860 según PRT, 43% de los cuales operan en Sistema RED de Santiago), 35% en servicios rurales (11.600 según el RNTP y 11.470 según PRT) y un 11% en servicios interurbanos (3.935 según el RNTP y 3.801 según PRT). Hasta el año 2023, la penetración de buses cero emisiones era una realidad solo en el Sistema RED, donde un tercio de la flota era eléctrica.

Se considera que esta caracterización es fundamental para poder dimensionar los requerimientos de flota en caso de que se quiera explorar una nueva tecnología de propulsión, la cual no necesariamente posee las mismas ventajas comparativas en diferentes contextos de operación urbano-rural-interurbano.

3.1.2 Buses a Hidrógeno

3.1.2.1 Características Técnicas y Origen de los Buses

Se hizo un levantamiento de las marcas y modelos de buses a hidrógeno existentes. La siguiente tabla resume las principales características de los modelos disponibles en el mercado que se analizaron. Con respecto a la información indicada en la tabla, se distinguen los apartados de potencia, tanto para los motores eléctricos como para las celdas de combustible propiamente tales. En el caso de los motores eléctricos, la potencia indicada se refiere a la potencia eléctrica que requiere el motor para realizar el trabajo de tracción, mientras que la potencia de las celdas de combustible se refiere directamente a la potencia eléctrica que las celdas pueden aportar, para cubrir la potencia demandada por el motor eléctrico. Para información en detalle, ver 2.3.2.

Este levantamiento consideró la revisión de estudios previos disponibles y diversos sitios web, especialmente los correspondientes a cada uno de los fabricantes y proveedores. Al respecto, es importante mencionar que no todos los proveedores entregan la misma información. En muchos casos, fue posible descargar las fichas técnicas de cada modelo, las cuales se encuentran adjuntas en los anexos digitales del presente informe. Adicionalmente, se tomó contacto con cada uno de los proveedores de buses para solicitar mayor detalle en las características de los vehículos, así como solicitar cotizaciones de los mismos. Lamentablemente, no fue posible contar con cotizaciones específicas.

La tabla siguiente reporta aquellas empresas para las cuales fue posible identificar modelos de buses a hidrógeno. Sin embargo, se tomó contacto también con otras empresas posibles fabricantes para los cuales no ha sido posible, a partir de la información recabada, identificar modelos de buses a hidrógeno actualmente disponibles. Estas empresas son Golden Dragon (China), Yutong (China), Van Hool (Bélgica) y VDL (Holanda). De estas últimas se recibió respuesta tanto de Golden Dragon como Yutong quienes señalaron que no poseen modelos disponibles comercialmente en la actualidad.

Es necesario mencionar que al tomar contacto con la empresa Toyota y Caetano, ellos señalaron que desde hace algunos meses se encuentran trabajando con GIZ y DTPM (Directorio de Transporte Público Metropolitano) en el desarrollo de un proyecto piloto de bus a hidrógeno en el cual se ha incorporado el operador del sistema RED Transdev.

Adicionalmente, se tomó contacto con la empresa Reborn Electric Motors que participó en el desarrollo del primer bus a hidrógeno en el país. Este proyecto comenzó en enero de 2024 y permitió construir un bus en 12 meses. Este bus aún no se encuentra homologado, ocupa celdas de combustible Toyota y posee una capacidad de 30 pasajeros, posee 9 metros de largo y una sola puerta (solo transporte privado de pasajeros).

Tabla 3-6: Marcas y modelos de buses a hidrógeno – Primera Parte

Marca	Modelo	País	Tipo	Pisos	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Motor Eléctrico		Celda Combustible		Tanque H2			
								Marca	Potencia (kW)	Marca	Potencia (kW)	Capacidad (kg)	Capacidad (l)	Presión de llenado (Bar)	Tiempo recarga (min)
New Flyer	Xcelsior CHARGE FC 40'	USA	FCEV	1	12,5	2,6	3,3	Siemens	160	Ballard	100	37,5			6 a 10
	Xcelsior CHARGE FC 60'		FCEV	1	18,5	2,6	3,3	Siemens	320	Ballard	100	56			12 a 20
Caetano/ Toyota	H2 City Gold RHD	Portugal	FCEV	1	10,7	2,5	3,5	Siemens	180	Toyota	60	37,5	1560	350	9
	H2 City Gold LHD		FCEV	1	12,0	2,5	3,5	Siemens	180	Toyota	70	37,5	1560	350	9
Safra	HYCITY	Francia	FCEV	1	12 y 18	2,6	3,3		250		45	35		350	10 a 15
ENC	Axess EVO FC 40'	USA	FCEV	1	12,4	2,6	3,6		300		125	57,5		350	12-20
Hyundai	ELEC CITY Fuel Cell	Corea	FCEV	1	11,0	2,5	3,4		180		180	34,0	875	700	
Foton	Hydrogen Fuel Cell City Bus	China	FCEV	1	12,4	2,5	3,5		150/250	Toyota	60		1120	350	
Solaris	Urbino 12 hydrogen	Polonia	FCEV	1	12	2,6	3,3		240		70		1560		
	Urbino 18 hydrogen		FCEV	1	18	2,6	3,3		240		100		1560		
Alexander Dennis	Enviro 400 FCEV	UK	FCEV	2	11,1	2,6	4,3	Voith	250/350	Ballard	45/60	29,4		350	5
Ankai	Ankai 12M hydrogen fuel bus	China	FCEV	1	12	2,6	3,4		100						
Rampini	Hydron M3 -CLASSI	Italia	FCEV	1	8	2,2	3,3		230			10,8		350	
Wright	GB KITE DF FCEV HYDROLINER	UK (Irlanda del Norte)	FCEV	1	10,9-11,6-12,5	2,5	3,4			Ballard	70	32-40-50		350	10
	STREETDECK FCEV HYDROLINER		FCEV	2	10,9	2,5	4,4			Ballard	85	27	1120	350	8
Zhongtong	Hydrogen Energy Bus	China	FCEV	1	8,7 a 12,2	2,6	3,2-3,3	JJE/Dana							
Quantron	CIZARIS 12m FCEV	Alemania	FCEV	1	12,2	2,6	3,5		350			35	1400	350	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-7: Marcas y modelos de buses a hidrógeno – Segunda Parte

Marca	Modelo	Batería			Autonomía (km)	Velocidad máx (km/hr)	Consumo Estimado (kg/100 km)	Pasajeros		Max GVW (kg)	Carrocería
		Tipo	Marca	Energía (kWh)				Total	Sentados		
New Flyer	Xcelsior CHARGE FC 40'	NMC			595			82	40		
	Xcelsior CHARGE FC 60'	NMC			595			125	52		
Caetano/ Toyota	H2 City Gold RHD	LTO		44	500		5.5	64			aluminio ligero
	H2 City Gold LHD	LTO		44-80	600		5.5	95			
Safra	HYCITY	NMC		130	500					21.000	
ENC	Axess EVO FC 40'	LTO		26	405				43	20.385	A.I o AC-HR
Hyundai	ELEC CITY Fuel Cell	Li-Ion		78.4	550			48	22		
Foton	Hydrogen Fuel Cell City Bus		CATL	150		90		84		18.000	
Solaris	Urbino 12 hydrogen	Li-Ion						41			A.I
	Urbino 18 hydrogen	Li-Ion						58			
Alexander Dennis	Enviro 400 FCEV	Li-Ion		30	482			88			aluminio
Ankai	Ankai 12M hydrogen fuel bus	LiMnO2		50,44				89		18.000	
Rampini	Hydron M3 -CLASSI	LiFePO4		175	400			45-48	14	12.000	acero
Wright	GB KITE DF FCEV HYDROLINER	LTO	Microvast	54	724-901-1030			88-85-82	37-41-45	19.500	
	STREETDECK FCEV HYDROLINER	LTO	Forsee	27,4	451			86	65	18.500	
Zhongtong	Hydrogen Energy Bus			230-423	200-300			24-34			
Quantron	CIZARIS 12m FCEV	LiFePO4	CATL	105,3	500			86	26		

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.2 Valores de los Buses

Se tuvo una reunión con profesionales de DTPM que se encuentran desarrollando la experiencia piloto de bus a hidrógeno en Santiago. Según se comentó en la reunión está en conversaciones con tres proveedores de buses a hidrógeno (Quantron, Caetano y Fotón) y hasta el momento los precios que manejan están en el rango 450.000-650.000 euros por vehículo.

Por otra parte, recientemente (diciembre 2024) se realizó el lanzamiento del primer bus a hidrógeno hecho en Chile por una iniciativa liderada por Anglo American, Colbún y Reborn Electric Motors, con financiamiento de CORFO. El costo de este bus publicado en la prensa es de USD750.000.

De forma de complementar la información de precios de buses que pueda ser proporcionada por los distintos proveedores contactados, se realizó una revisión de literatura reciente sobre el tema.

La siguiente figura muestra un análisis de los costos de adquisición de buses de 12 metros de largo en Estados Unidos entre los años 2015-2023 según tipo de tecnología de propulsión realizado por la empresa IDTechEx. Según este análisis, el precio promedio de un **bus de tipo FCEV es aproximadamente 3 veces mayor al de un bus Diésel y 1,6 veces al de un bus eléctrico.**

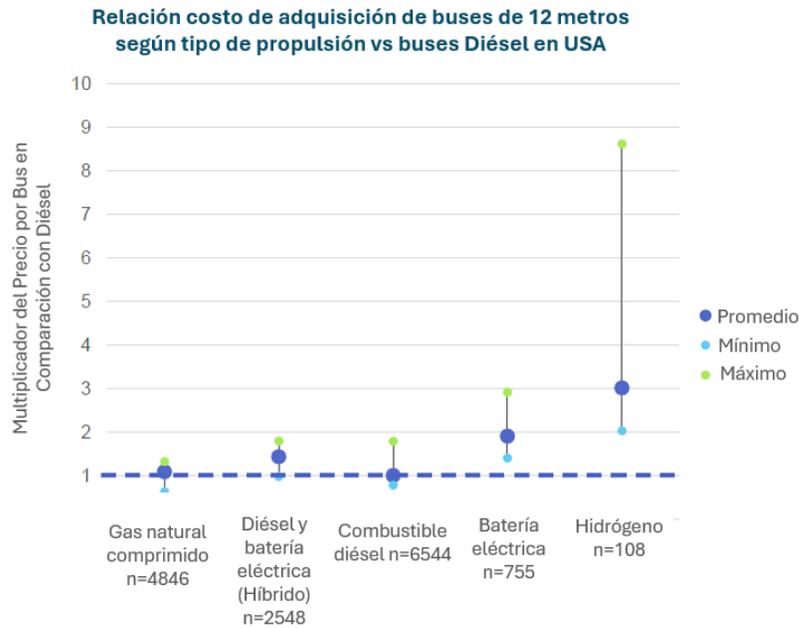


Figura 3-4: Relación costo de adquisición de buses de 12 metros según tipo de propulsión vs buses Diésel en USA

Fuente: Traducido al Español de IDTechEX, 2024

Por otra parte, [51] realizaron una revisión de la literatura disponible sobre buses propulsados con celdas de combustible (FCEV). Según estos autores, a junio 2023, aproximadamente 7.000 buses de celdas de combustible estaban operativos en el mundo, 85% de los cuales, en China, pero también en Europa, Corea, USA y Japón.

Las siguientes figuras muestran los costos de adquisición de buses FCEV reportados en [51] a partir de una revisión de la literatura al respecto. Se indica el año tomado de referencia en cada análisis y se proyectan precios hasta el año 2035. Tal como se puede observar, **la relación entre los costos de adquisición de buses FCEV con respecto a buses Diésel estaría actualmente entre 1,82 y 2,51 y se proyecta que decrezca en la próxima década.**

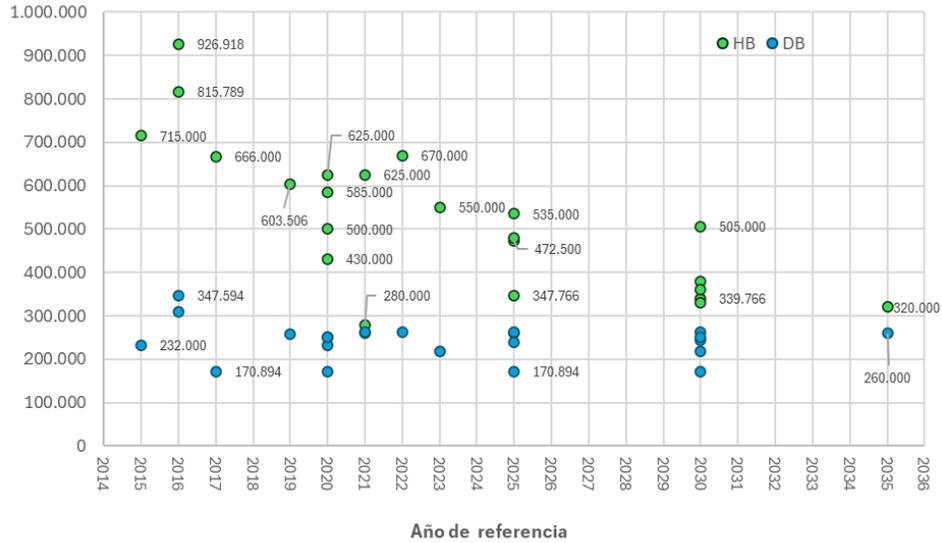


Figura 3-5: Costo de adquisición de buses a hidrógeno vs buses Diésel según literatura (EUR)

Fuente: Elaboración propia a partir de [51]

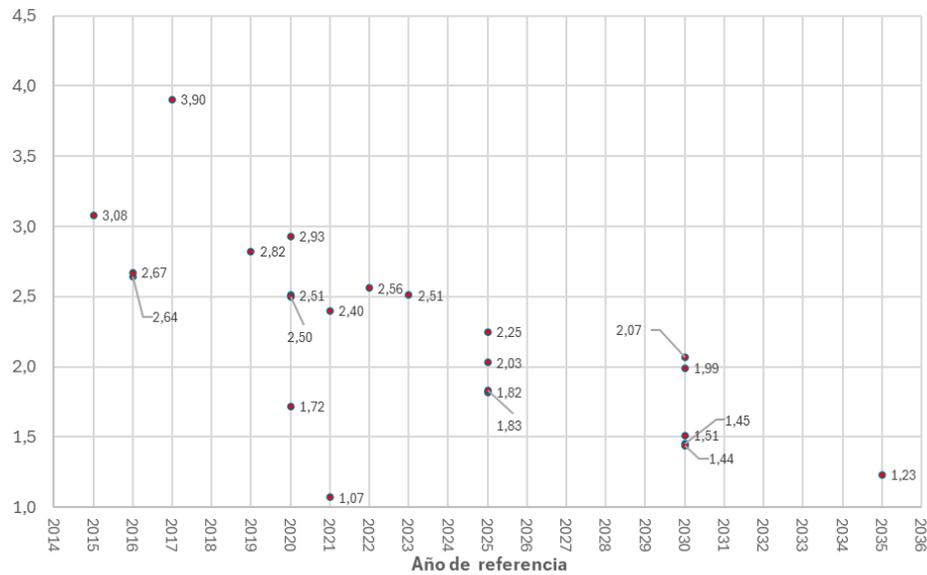


Figura 3-6: Relación costo de adquisición de buses a hidrógeno vs buses Diésel según literatura

Fuente: Elaboración propia a partir de [51]

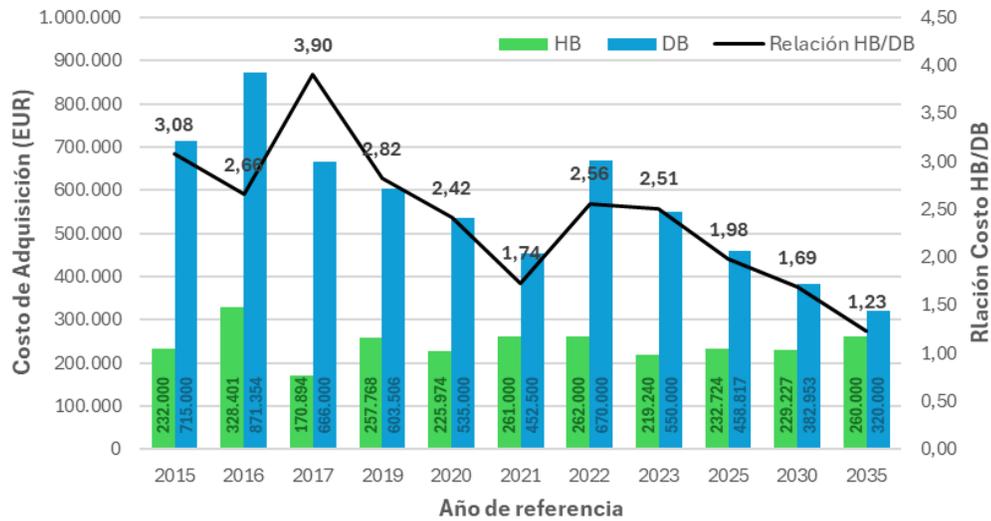


Figura 3-7: Costo de adquisición promedio buses a hidrógeno vs buses Diésel según literatura (EUR)

Fuente: Elaboración propia a partir de [51]

3.2 Camiones de Transporte de Carga

3.2.1 Camiones Actualmente en Operación

Según la base de datos de Plantas de Revisiones Técnicas (PRT), el año 2023 aprobaron su revisión técnica en el país 254.216 camiones, de los cuales 191.027 corresponden a la categoría camión y 63.189 a tractocamión. Estos totales son coherentes en magnitud con la base de datos de permisos de circulación 2023, que consideran un total de 223.251 camiones, de los cuales 164.597 serían camiones y 58.654 tractocamiones.

Al revisar en mayor detalle la categoría camiones de la base de datos de PRT, el 93% de los camiones, corresponde a las siguientes 18 marcas.

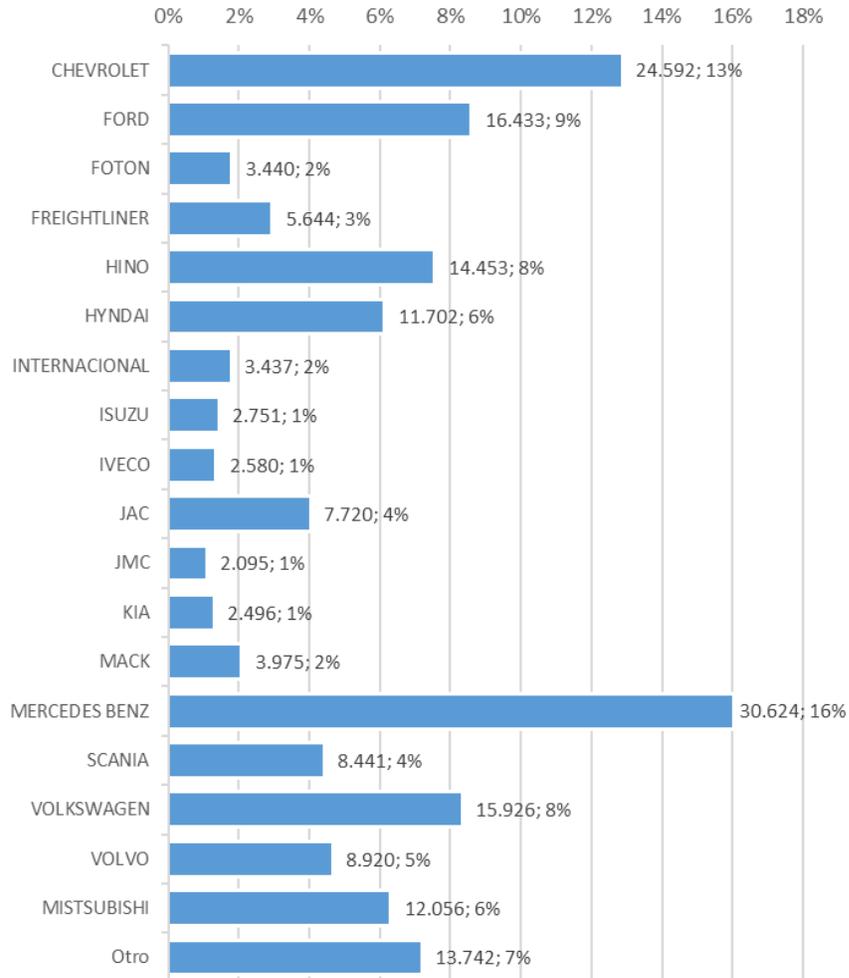


Figura 3-8: Cantidad de Camiones según Marca, PRT 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

Las siguientes figuras muestran cómo es la distribución entre las 18 marcas más comunes de camiones según su año de fabricación y la antigüedad promedio por marca. La antigüedad promedio de los camiones es 13 años (año fabricación promedio 2011) y el 40% de la muestra corresponde a camiones con año de fabricación menor o igual al 2010.

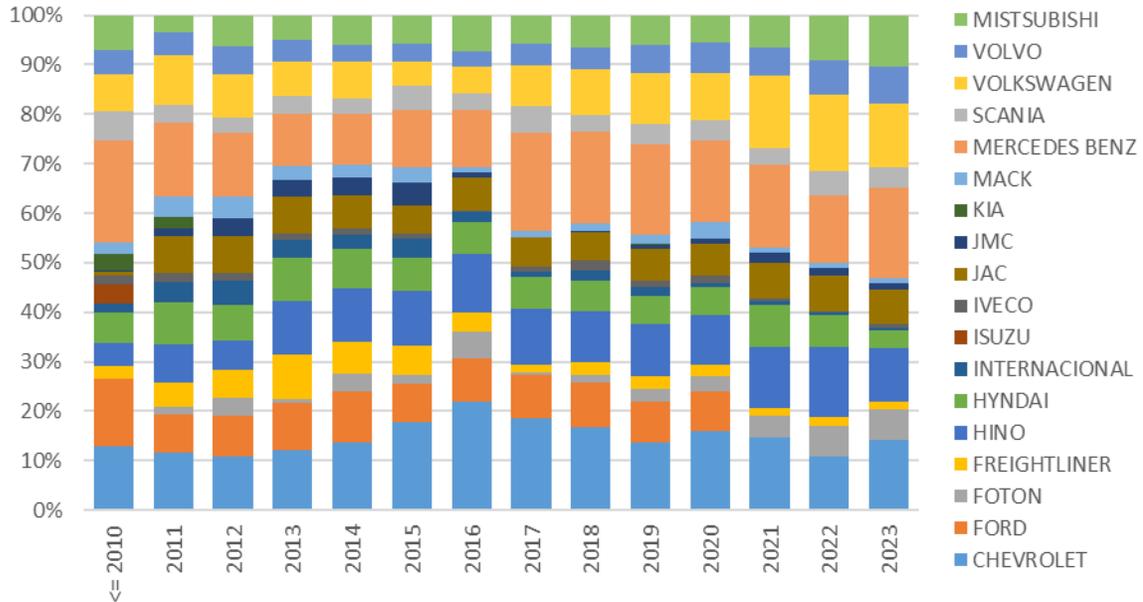


Figura 3-9: Partición de Marcas Más Relevantes de Camiones según Año de Fabricación, PRT 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

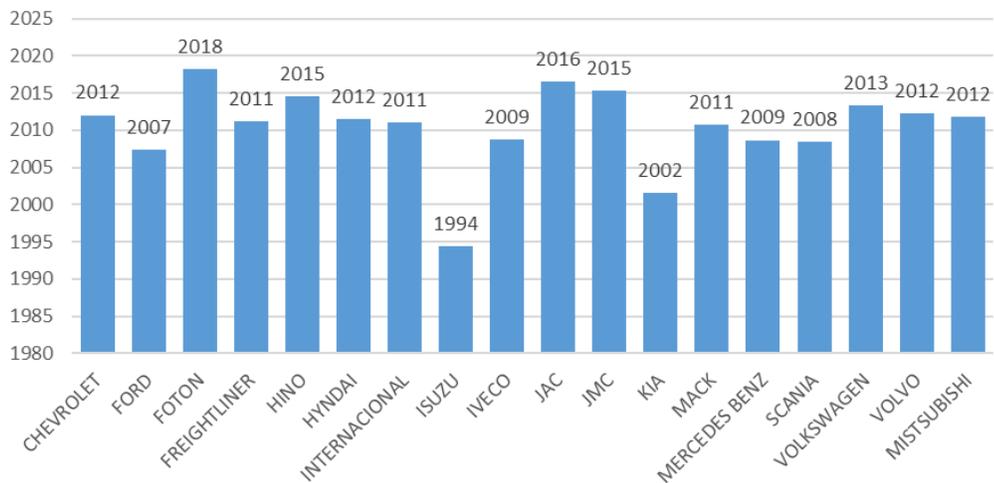


Figura 3-10: Antigüedad Promedio de Camiones según Marcas más relevantes, PRT 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

En el caso del tracto camiones, el 95% de los vehículos que obtuvieron revisión técnica el año 2023 corresponden a 12 marcas.

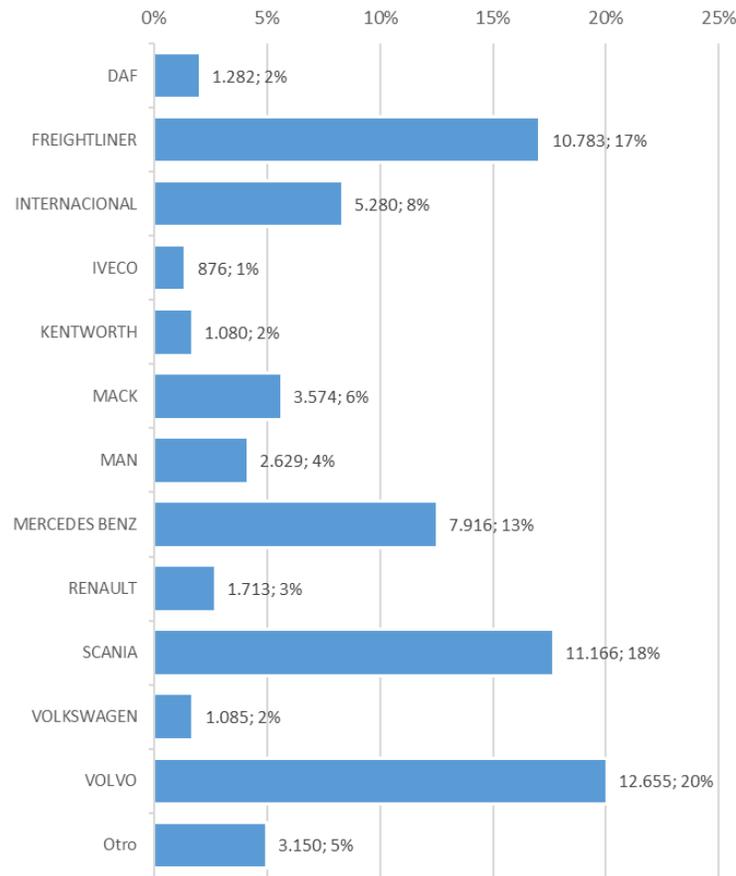


Figura 3-11: Cantidad de Tractocamiones según Marca, PRT 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

Las siguientes figuras muestran cómo es la distribución entre las 12 marcas más comunes de tractocamiones según su año de fabricación y la antigüedad promedio por marca. La antigüedad promedio de los tractocamiones es 11 años (año fabricación promedio 2013) y el 29% de la muestra corresponde a camiones con año de fabricación menor o igual al 2010.

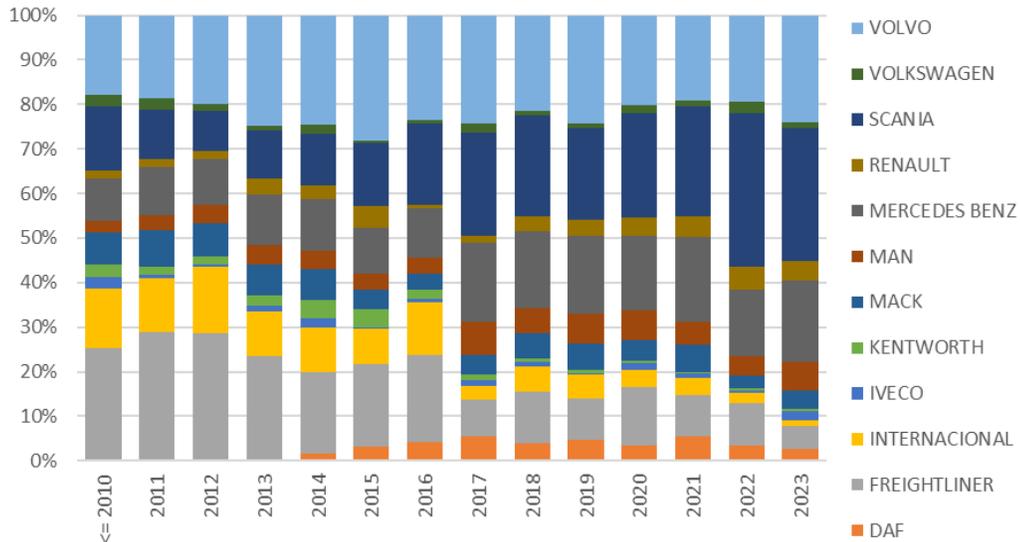


Figura 3-12: Partición de Marcas Más Relevantes de Tractocamiones según Año de Fabricación, PRT 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

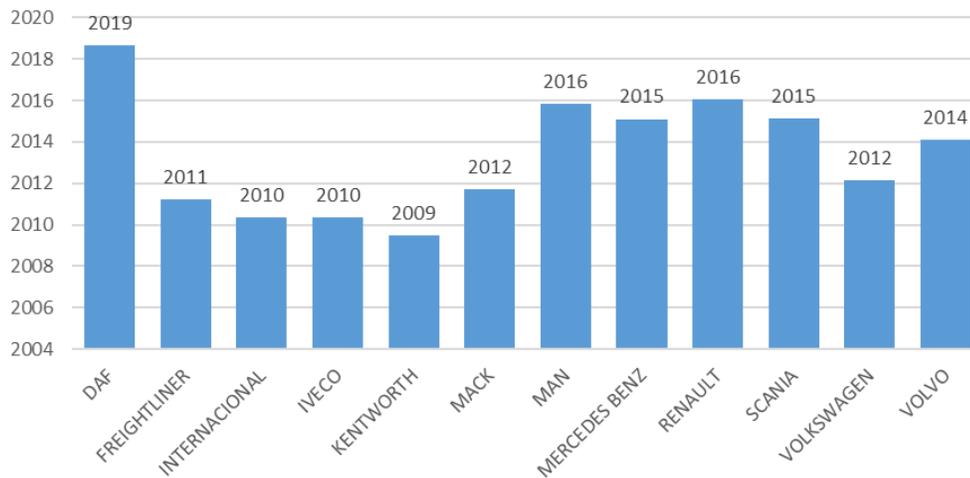


Figura 3-13: Antigüedad Promedio de Tractocamiones según Marcas más relevantes, PRT 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de PRT 2023

Por otro lado, al revisar las ventas de camiones y tractocamiones reportadas por la ANAC en la última década, se tienen los siguientes totales por año (primera figura) y por marca (segunda figura).

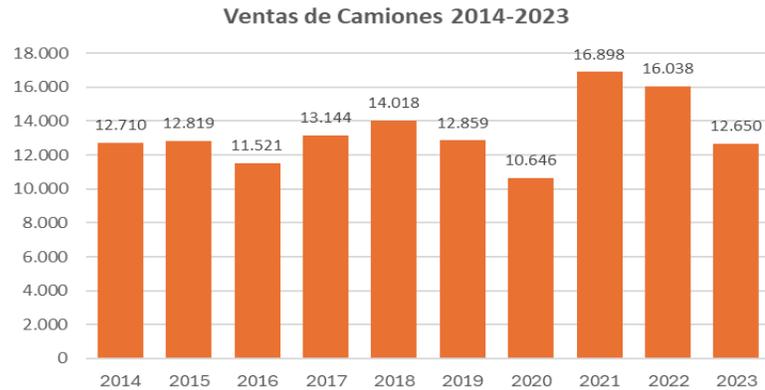


Figura 3-14: Totales de Ventas de Camiones y Tractocamiones entre los años 2014 y 2023

Fuente: Elaboración propia a partir de reportes ANAC

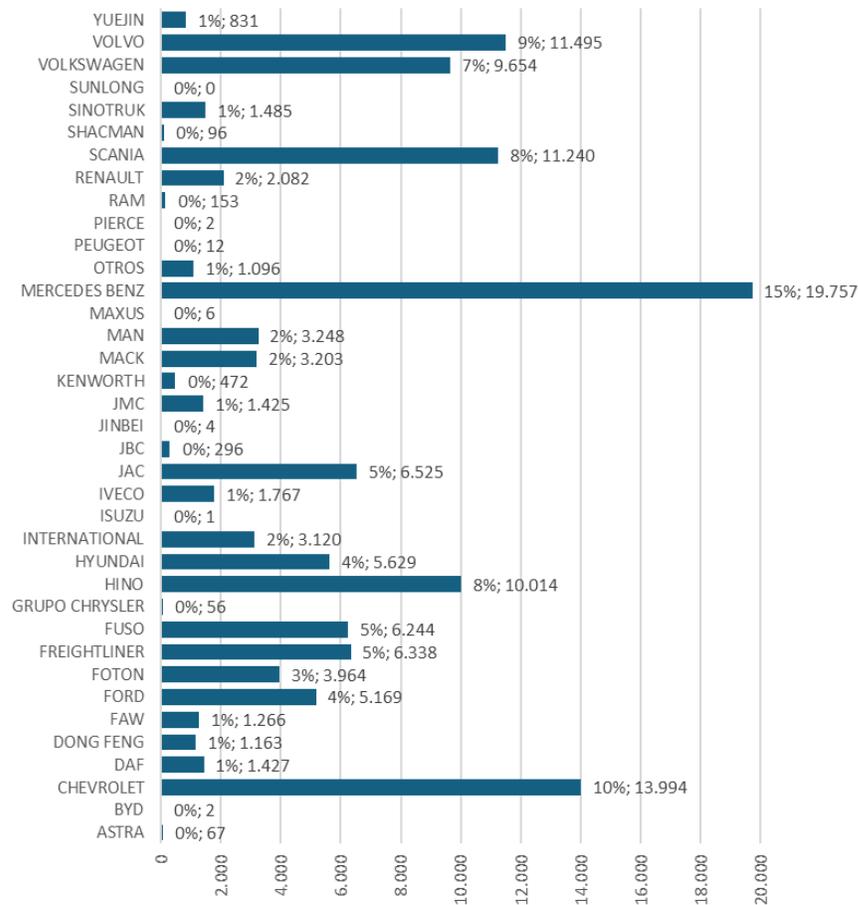


Figura 3-15: Total Ventas de Camiones y Tractocamiones entre los años 2014 y 2023 según Marca

Fuente: Elaboración propia a partir de reportes ANAC

Finalmente, a continuación, se entregan gráficos de algunos precios cotizados de camiones Diésel de las marcas más comunes para tener como referencia. Todos los camiones cotizados son norma de emisiones Euro V. El detalle de los modelos cotizados se encuentra disponible en Anexos.

Tal como se pudo observar en esta sección, anualmente se introducen al mercado chileno del orden de 15.000 camiones nuevos y las ventas de la última década han estado lideradas por la marca Mercedes Benz. El total de camiones existentes en el país al año 2023 supera los 220.000 vehículos, donde la gran mayoría (74-75%) corresponden a la categoría camión y el restante (26-25%) a tractocamión.

Se considera que esta caracterización es fundamental para poder dimensionar los requerimientos de flota en caso de que se quiera explorar una nueva tecnología de propulsión, la cual no necesariamente posee las mismas ventajas comparativas en diferentes contextos de operación.

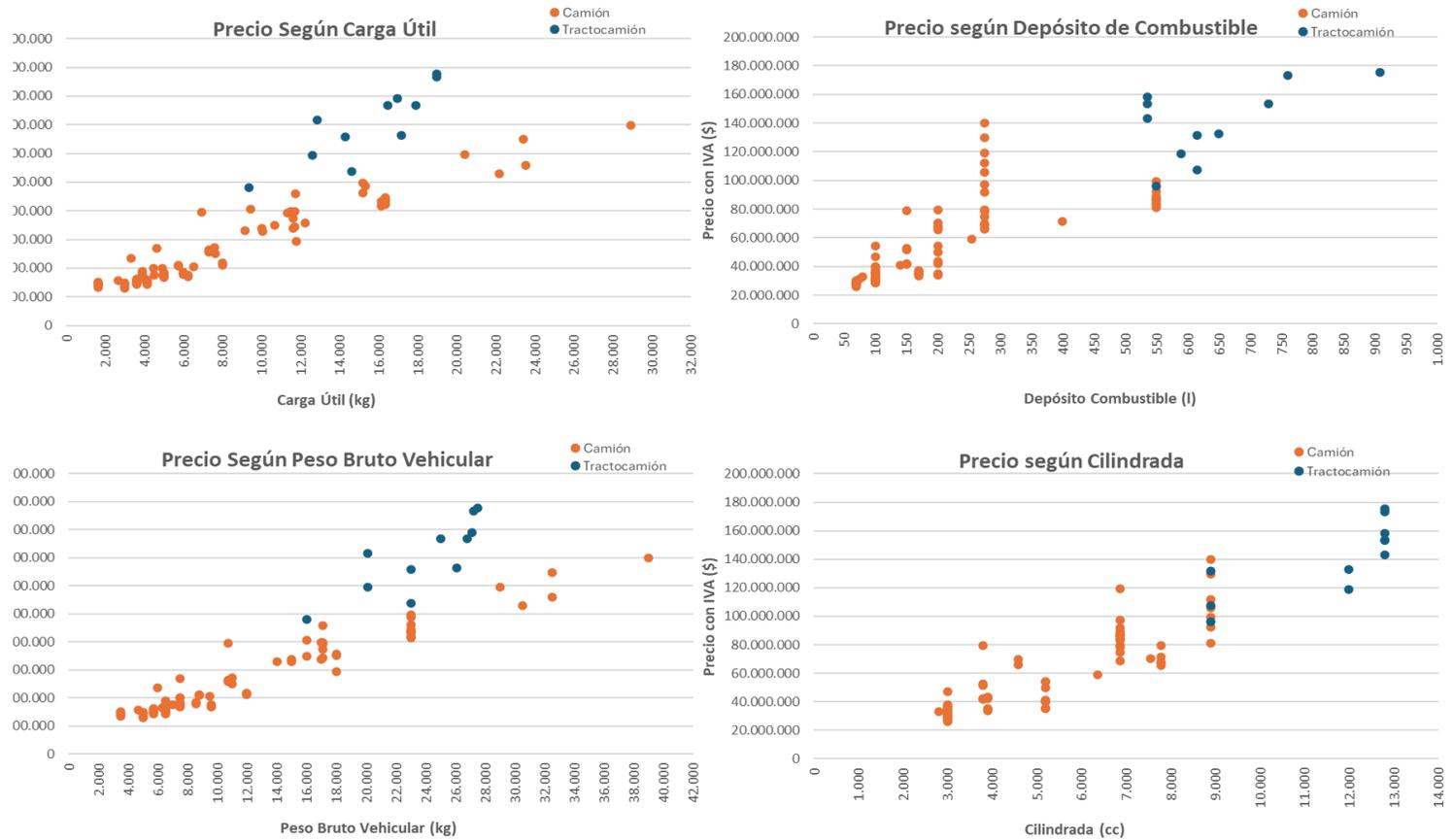


Figura 3-16: Precios Referenciales Camiones Diesel

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Camiones a Hidrógeno

3.2.2.1 Características Técnicas y Origen de los Camiones

Para el caso del transporte de carga, se realizó también un levantamiento de información sobre las condiciones actuales en el mercado en cuanto a camiones a hidrógeno y un reconocimiento de las marcas y modelos desarrollados en la actualidad.

Dentro de los vehículos propulsados con celdas de combustible, los camiones son los que presentaron el mayor crecimiento el año 2023 (50%), correspondiente al doble de rápido que los buses (IEA, 2024). Sin embargo, tras la revisión de la información disponible se revela que este crecimiento se refleja en el desarrollo de tecnología y pruebas, ya que actualmente en el mercado son pocos los modelos que se producen en serie y están disponibles en el comercio. De los modelos que están marcados como disponibles, se debe considerar que algunas marcas están disponibles solo en mercados selectos o en flotas con clientes específicos para pruebas operativas.

Además, las características de estos vehículos pueden variar según la configuración solicitada por el cliente, ya que son personalizables en función de la utilidad que se les quiera dar.

Se presenta a continuación una tabla comparativa con las 23 marcas y modelos de camiones encontrados (hasta la fecha) que se impulsan a través de Hidrógeno, con sus respectivas características. Cabe destacar que las características disponibles en la información recopilada difieren entre marcas y modelos, por lo que se prioriza mostrar la mayor cantidad de datos de cada uno de los modelos con la posibilidad de presentar más información en el futuro.

Tabla 3-8: Marcas y modelos de camiones a hidrógeno – Parte 1

Marca	Modelo	País	Disponibilidad en Mercado	Distancias entre ejes (m)	Largo (m)	Vel. Max. (km/hr)	Potencia motor eléctrico (kW)	FCEV/HICEV	Celda Combustible	H2 Líquido o gaseoso
Quantron AG	QHM FECV	Alemania	si	3,9	16,5	90	550	FCEV	Ballard Power	Gaseoso
Daimler - Mercedes Benz	GenH2	Alemania	no	3,9	12	85	460	FCEV	Cellcentric (Daimler Truck y Volvo Group)	Líquido
Dongfeng Motor	Dongfeng KL Fuel cell tractor	China	en desarrollo					FCEV		Gaseoso
Nikola	TRE FCEV	USA	si	4,6		112,6	575/400	FCEV	Bosch	Gaseoso
IVECO	Heavy Duty FCEV	Italia	si				350	FCEV	Bosch	Gaseoso
Isuzu	GIGA FUEL CELL	Japón	en pruebas					FCEV		Gaseoso
Peterbilt	579 HFC	USA	en pruebas					FCEV		Gaseoso
Groupe Renault (VOLVO)	Renault Master H2-Tech	Francia	En desarrollo					FCEV		Gaseoso
Foton	Foton E AUMAN 2549	China	Si (alianza SOTRASER en Chile)							Líquido
Hyundai	Xcient Fuel Cell Truck	Corea del Sur	si	5 -7,3	9,8 - 12	85	350	FCEV	Hyundai Mobis	Gaseoso
MAN	Man hTGX	Alemania	en pruebas	3,7	11	85	383	FCEV	PowerCell Sweden AB	Gaseoso
FAW	FAW Jiefang J7 Heavy Truck 6X4 Fuel Cell Tractor	China	si	3,8			290	FCEV		Gaseoso
Toyota	Toyota Hino 700 Series FCEV	Japón	en pruebas	2,5	12			FCEV	Toyota FC Stack	Gaseoso
Hyzon Motors	HYHD8-200	USA	si	5,3	8	89-105	450	FCEV	Hyzon Motors	Gaseoso
Hyzon Motors	HYHD8-110	USA	si	5,3	8	89-105	450	FCEV	Hyzon Motors	Gaseoso
Toyota - Kenworth	T680 FCEV	USA	si	3,8	12,5	112,7	310	FCEV	Toyota	Gaseoso
SAIC Maxus	Maxus Hydrogen FCEV	China	en pruebas	3,3	7,7	120	150	FCEV	Sunline	Gaseoso
Tewa Motors	Tewa FCEV	Inglaterra	si	3,5	10	90	150	FCEV	Ballard Power Systems	Gaseoso

Marca	Modelo	País	Disponibilidad en Mercado	Distancias entre ejes (m)	Largo (m)	Vel. Max. (km/hr)	Potencia motor eléctrico (kW)	FCEV/HICEV	Celda Combustible	H2 Líquido o gaseoso
VDL Groep	VDL Futura FCEV	Países Bajos	prototipo				210	FCEV	Ballard	Gaseoso
Dongfeng Motor	Dongfeng Hydrogen Fuel Cell Truck	China	en pruebas					FCEV		Gaseoso
Mitsubishi	eCanter F- Cell	Japón	en pruebas	3,4	6	80	135	FCEV	Daimler	Gaseoso
Hyzon Motors	HYZON REFUSE	USA	si			89	360	FCEV	Hyzon Motors	Gaseoso
Yutong	Yutong Hydrogen Truck	China	en pruebas					FCEV		Gaseoso

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-9: Marcas y modelos de camiones a hidrógeno – Parte 2

Marca	Modelo	Potencia Celda de combustible (kW)	Presión de almacenaje (Bar)	Tanque H2 (kg)	Batería (KWh)	Tiempo recarga (min)	Autonomía (km)	GVW (ton)	GCWR (ton)
Quantron AG	QHM FECV	240(2x120)	700	54/116	118	30	1.500	28	65
Daimler - Mercedes Benz	GenH2	300	700	88 (2x44)	70	15-20	1.000	26	40
Dongfeng Motor	Dongfeng KL Fuel cell tractor	260	400				1.000		
Nikola	TRE FCEV	200	700	70	164	20	805		27
IVECO	Heavy Duty FCEV		700	70		20	800		24,7
Isuzu	GIGA FUEL CELL	-					800		
Peterbilt	579 HFC	210		60	200	30	724,05		37,19
Groupe Renault (VOLVO)	Renault Master H2-Tech			7.5 - 9		5	700		
Foton	Foton E AUMAN 2549	354	350		53		670		49
Hyundai	Xcient Fuel Cell Truck	180	350	31	72	8-10	600	19,5-27	36
MAN	Man hTGX	320(160x2)	700	56	90	10-15	600	26	35



Marca	Modelo	Potencia Celda de combustible (kW)	Presión de almacenaje (Bar)	Tanque H2 (kg)	Batería (KWh)	Tiempo recarga (min)	Autonomía (km)	GVW (ton)	GCWR (ton)
FAW	FAW Jiefang J7 Heavy Truck 6X4 Fuel Cell Tractor	150		42	42	10-30	600		
Toyota	Toyota Hino 700 Series FCEV		700				600	25	
Hyzon Motors	HYHD8-200	200	350	50	110	15	563,15		
Hyzon Motors	HYHD8-110	110	350	50	110	15	563,15		
Toyota - Kenworth	T680 FCEV	300(2x150)	700	58.8	100	15-20	480		36
SAIC Maxus	Maxus Hydrogen FCEV	70	350	7.5	40	10-15	400	7,5	11,5
Tevva Motors	Tevva FCEV	70	350	6	70	10-15	400	16	26
VDL Groep	VDL Futura FCEV	88	350	30	84		400	25	40
Dongfeng Motor	Dongfeng Hydrogen Fuel Cell Truck	30					330	7,5	
Mitsubishi	eCanter F- Cell	60	350	4.2	13,8	3-5	300	7,5	9
Hyzon Motors	HYZON REFUSE	110	350	25	55		201,125		29
Yutong	Yutong Hydrogen Truck								

Fuente: Elaboración Propia

El desarrollo de este levantamiento no solo facilita la comparación entre las tecnologías disponibles, sino que también, permite evaluar la competitividad de los diferentes fabricantes y las posibles barreras para la entrada al mercado, tales como los costos asociados a la compra, costos de envío y mantenimiento de estos vehículos.

Dentro de las características recopiladas, se destacan camiones que operan tanto con celdas de combustible de hidrógeno gaseoso como con celdas de hidrógeno líquido. Mientras que el hidrógeno líquido generalmente ofrece una mayor autonomía en comparación con el hidrógeno gaseoso, su adopción plantea ciertos desafíos. El principal obstáculo radica en la infraestructura especializada necesaria para el almacenamiento y la distribución de hidrógeno líquido, que requiere condiciones de temperaturas extremadamente bajas (-253 °C). Aunque este tipo de hidrógeno proporciona una mayor densidad energética y permite un almacenamiento más eficiente, la infraestructura aún está en etapas de desarrollo y sigue siendo más limitada en comparación con la infraestructura más establecida para el hidrógeno gaseoso.

Por lo tanto, aunque el hidrógeno líquido ofrece un gran potencial para vehículos de larga distancia gracias a su mayor autonomía, su implementación a gran escala dependerá de la expansión de la infraestructura y de avances en la tecnología de almacenamiento. En



contraste, el hidrógeno gaseoso continúa siendo una opción más accesible y viable a corto plazo, especialmente en regiones donde la infraestructura ya está en marcha.

Otra característica importante al momento de estudiar la factibilidad técnica corresponde a la autonomía de cada vehículo. A continuación, se presenta una figura en la que se muestra la autonomía de camiones de cero emisiones, según el peso del vehículo y el alcance. También se diferencian en esta figura (publicada en 2024) los modelos que se encuentran en producción en serie en el comercio y aquellos que no.

Autonomía de Camiones Medianos y Pesados de Cero Emisiones: Peso del Vehículo vs Autonomía

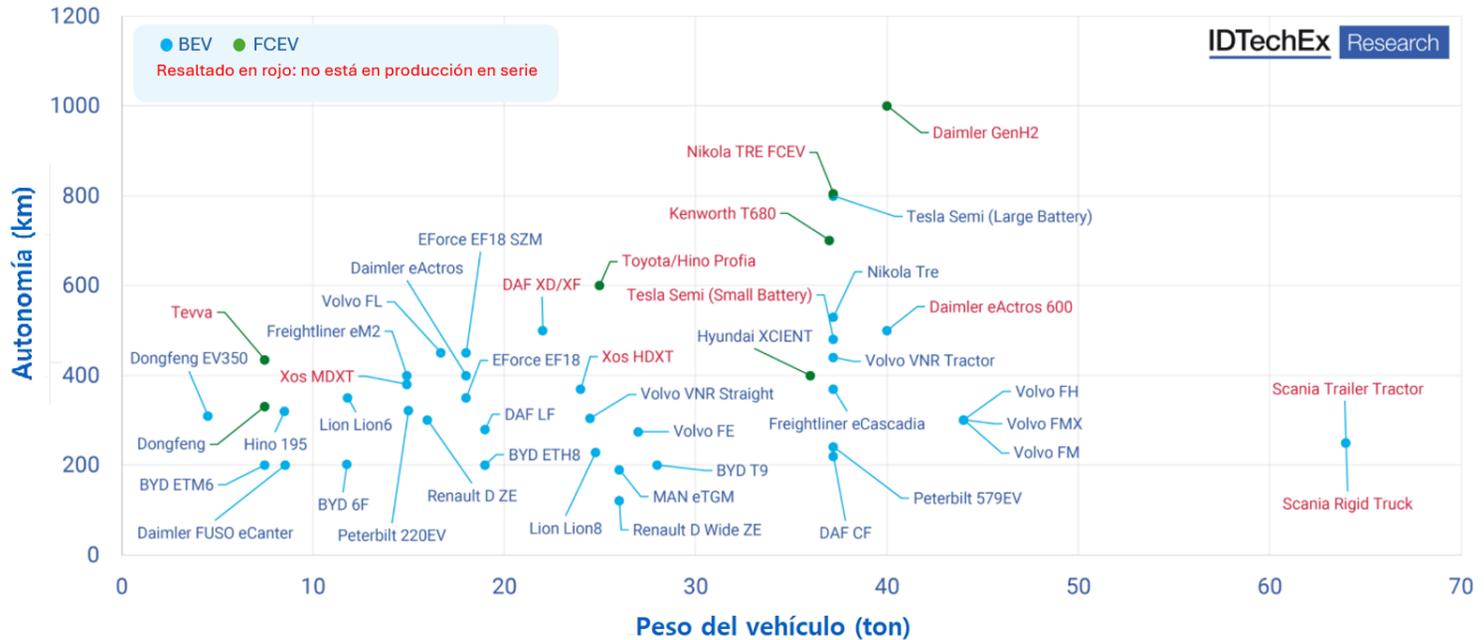


Figura 3-17: Autonomía de camiones de cero emisiones según peso del vehículo y alcance

Fuente: Traducido al Español de IDTechEx, OEM data

En la figura se muestran camiones de cero emisiones de los tipos FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*) y BEV (*Battery Electric Vehicle*), indicando la autonomía y el peso aproximado de cada uno de los modelos. El camión con mayor autonomía es el **Daimler GenH2**, un modelo a hidrógeno de la marca alemana que tiene un peso cercano a las 40 toneladas y alcanza una autonomía de hasta 1.000 kilómetros. Le siguen los modelos **Nikola TRE FCEV** y **Tesla Semi Large Battery (BEV)**, ambos con una autonomía de 800 km y un peso aproximado de 38 toneladas.

La figura también revela que no existe una tendencia clara entre la autonomía y el peso de los vehículos, y se observa que actualmente hay una mayor variedad de camiones eléctricos (BEV) en comparación con los camiones a hidrógeno (FCEV). Además, al observar los modelos destacados en rojo (que no se encuentran en producción en serie), se concluye que, de los 7 modelos de camiones a hidrógeno mostrados en la figura, solo 2 están en producción en serie: el **Hyundai XCIENT** y el **Dongfeng**.

El análisis de las marcas y modelos de camiones de hidrógeno nos permite identificar tanto los vehículos que están actualmente en operación, como aquellos en desarrollo o en fase de prueba. A través de la recopilación de datos sobre **la potencia de las celdas de combustible, la autonomía, los costos operativos y las especificaciones técnicas de cada modelo**, es posible realizar un diagnóstico de la viabilidad de su adopción para los objetivos del Estudio.

3.2.2.2 Valores y consumo de Hidrógeno

El costo de un camión a hidrógeno es altamente variable, dependiendo de factores como las características técnicas del vehículo, la tecnología de celdas de combustible, los costos de producción, los envíos y los incentivos gubernamentales disponibles. Por ejemplo, el modelo Tre FCEV de Nikola, un camión eléctrico de celdas de hidrógeno tuvo un precio promedio de venta de **USD \$351.000** en el cuarto trimestre de 2023 (Nikola, 2024) y al contactarlos directamente para este estudio señalaron que el precio del modelo FCEV 2025 es de **USD \$485.000** (mientras que el modelo eléctrico posee un valor de USD \$440.000). Sin embargo, esta empresa señaló que actualmente solo fabrica y hace entregas en Estados Unidos.

En Chile, **Walmart Chile** y **Marval Clean Logistics** presentaron el primer camión de larga distancia alimentado por hidrógeno verde, respaldado por el Programa Tecnológico (PTEC) de Corfo. Este camión eléctrico de carga pesada, con tecnología de cero emisiones de CO₂, implicó una inversión de **USD \$400.000**, marcando un hito en la movilidad sustentable del país. Cabe destacar que en la actualidad este no es el único camión a hidrógeno en circulación en Chile, **Sotraser** (empresa de transporte) recientemente adquirió de Andes Motors el Foton E AUMAN 2549 6X4 el cual es un modelo que no se encuentra actualmente en el mercado como un camión a hidrógeno, sino, en su versión eléctrica.

Otro factor que influye en el costo de los camiones a hidrógeno corresponde a la economía de escala. Mientras más unidades se produzcan, menores serán los costos unitarios. Sin embargo, en esta etapa, los camiones a hidrógeno siguen siendo un mercado de nicho, se encuentran en pruebas o se desarrollan para un propósito en específico y son la gran mayoría los que no han comenzado el proceso de producción en serie.

En el estudio “*A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks*” [52] se presenta una recopilación de precios de distintos tipos de camiones. Se muestra a continuación un extracto de lo presentado en ese estudio en lo referente a camiones de hidrógeno.

Tabla 3-10: Precios Referenciales de camiones a hidrógeno Clase 8

País	Tipo de camión	Sistema de potencia	Especificaciones técnicas (2020)	Autonomía	Precio Comercial (USD)		Fuente Original
					2018–2020	2025/2030	
U.S.	Class 8 tractor truck	Fuel cell	FC stack: 303 kW	1.200 km	\$386.000	\$258.000 (2025)	National Renewable Energy Laboratory (Hunter et al., 2021)
U.S.	Class 8 tractor truck	Fuel cell	FC stack: 303 kW	805 km	\$329.000	\$241.000 (2025)	National Renewable Energy Laboratory (Hunter et al., 2021)
U.S.	Class 8 day cab	Fuel cell		402 km	\$312.700	\$198.900 – \$248.100 (2025)	Argonne National Laboratory (Islam et al., 2020); Burnham et al., (2021)
U.S.	Class 8 sleeper cab	Fuel cell		805 km	\$359.500	\$233.200 – \$288.900 (2025)	Argonne National Laboratory (Islam et al., 2020); Burnham et al., (2021)
U.S.	Class 8 tractor truck	Fuel cell	FC stack: 175 kW	290 km	\$629.100	\$227.600 (2030)	California Air Resource Board (2019)
U.S.	Class 8 tractor truck	Fuel cell		966 km		\$249.900	California Air Resource Board (2019)

Nota: un camión clase 8 corresponde a un vehículo cuyo GVWR es superior a 15 ton.

Fuente: Sharpe & Basma, 2022

En la tabla se observa una baja de precio esperada hacia el futuro dependiente de la producción en serie, y los costos promedios hasta el 2020 alcanzan la suma de **USD \$403.206** mientras que los costos promedios esperados a los años de estudio futuro serán de **USD \$252.250** (para los años 2025 o 2030 según correspondan y considerando el rango superior).

Por otro lado, una de las características a considerar en la evaluación técnico-económica son los costos operacionales, en los cuales el consumo de cada vehículo representa una parte significativa de estos costos. En esta línea, se presenta una figura que muestra algunos modelos FCEV y la relación entre su peso y el consumo de Hidrógeno estimado cada 100 kilómetros.

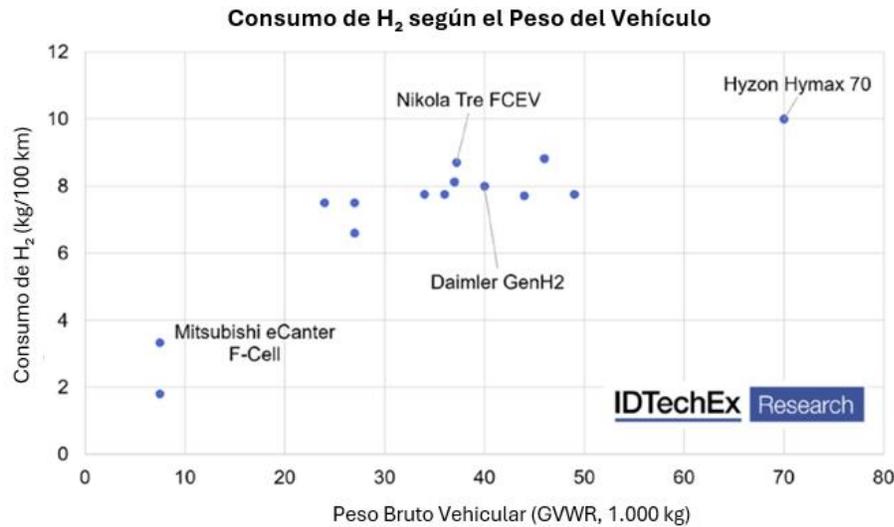


Figura 3-18: Consumo de Hidrógeno según peso de vehículo, camiones FCEV

Fuente: Traducido al Español de IDTechEx, OEM data

En la figura se observa una clara tendencia: a mayor peso del vehículo, mayor es el consumo de hidrógeno, aunque con algunas variaciones según la marca. En un extremo, encontramos el modelo **Hyzon Hymax 70**, uno de los camiones más pesados con esta tecnología, que alcanza las 70 toneladas y consume aproximadamente 10 kg/100 km. En el otro extremo, está el modelo **Mitsubishi eCanter F-Cell**, un camión de carga liviana de 10 toneladas, con un consumo cercano a 4 kg/100 km.

Se muestra también una tabla que compara el consumo promedio de los camiones ICE (*Internal combustion Engine*) con el consumo de un camión FCEV.

Tabla 3-11: Comparación de consumo camiones ICE y FCEV

Camión ICE		Camión FCEV	
Consumo promedio de litros cada 100km	30-40	Rendimiento en kilómetros por kilogramo de Hidrógeno	6-10
Precio promedio de combustible (EUR)	1.17	Precio promedio de kilogramo de Hidrógeno (EUR)	13.85
Precio promedio cada 100 km (EUR)	35-47	Precio promedio cada 100 km (EUR)	83-139

Fuente: Elaboración propia a partir de Edmondson et al (2024)

Se concluye en el mismo estudio que el precio del hidrógeno debería situarse en torno a **6 euros/kg (o 7 USD/kg)** para competir económicamente con el diésel.

Finalmente, este proceso de investigación permite identificar las tendencias y avances tecnológicos en el ámbito de la propulsión a hidrógeno. En este contexto, es crucial no solo analizar las características específicas de cada vehículo (como la capacidad de las celdas de combustible, las opciones de almacenamiento de hidrógeno, las baterías y la autonomía, entre otros anteriormente presentados), sino también evaluar los sistemas de carga y

la infraestructura requerida para respaldar esta transición energética. Esta información es fundamental para proyectar el futuro del transporte pesado a hidrógeno, asegurando que la implementación de estos vehículos sea no solo viable desde el punto de vista técnico, sino también económicamente sostenible.

Por otro lado, y en cuanto a los costos y la implementación del hidrógeno en Chile, es relevante considerar los **avances en el sector minero**, particularmente en la integración del hidrógeno en camiones de alto tonelaje, como los CAEX (Camiones de Alto Extractivo). Estos camiones son esenciales para las operaciones mineras, y la adopción de tecnologías de hidrógeno promete reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que resulta en un doble beneficio: mejorar la sostenibilidad de la minería y reducir los costos operativos a largo plazo.

Existen diversos estudios en desarrollo que exploran la viabilidad del hidrógeno como fuente de energía en los camiones CAEX, tanto en versiones FCEV como en versiones Dual Fuel (hidrógeno y diésel). Un ejemplo destacado es el **Consortio CORFO-Combustión Dual Hidrógeno-Diésel para Camiones Mineros (CAEX)**, que busca demostrar la viabilidad de utilizar un motor de combustión dual, combinando hidrógeno y diésel, en camiones mineros de alto tonelaje. Este proyecto se alinea con las metas de sostenibilidad de la industria minera, mientras que las pruebas y la investigación continúan evaluando la eficiencia y la viabilidad económica de esta alternativa [2].

Dentro de los logros más notables en este campo, se encuentra el primer camión CAEX a hidrógeno, desarrollado como parte de un proyecto piloto a nivel mundial por Anglo American. Este proyecto contó con la activa participación de Anglo American Chile, quien ha sido pionero en la implementación de tecnologías sostenibles en el sector minero, y su camión CAEX a hidrógeno representa un avance significativo en la transición hacia un transporte más limpio en la minería.

A continuación, se presenta un gráfico sobre la evolución del costo total (costos de adquisición y operación) para los camiones CAEX, que muestra los costos acumulados durante la vida útil del camión, comparando las tecnologías tradicionales con las opciones de hidrógeno y otras tecnologías emergentes.

Evolución del Costo Total de Propiedad (TCO) para CAEX

(En base a camión de 300 toneladas a cielo abierto)

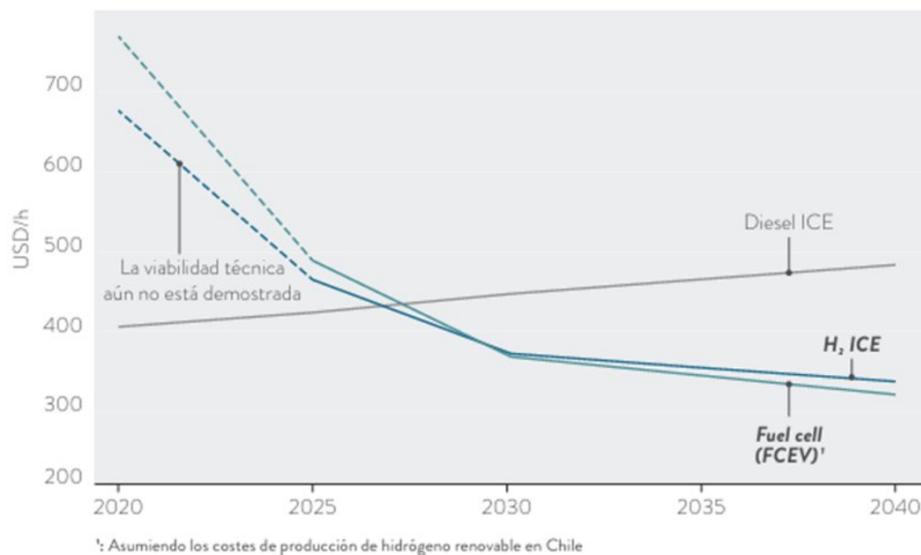


Figura 3-19: Evolución de Costos Totales para CAEX (En base a camión de 300 toneladas a cielo abierto)

Fuente: Traducido al Español de Hidrógeno Verde en Minería, H2 Chile. Fuente original: Hydrogen Council, 2021

3.3 Sistemas de Carga de Hidrógeno para Buses de Transporte de Pasajeros y Camiones de Transporte de Carga

Como se mencionó previamente, las estaciones de carga de hidrógeno incluyen equipos clave como compresores, dispensadores, tanques de almacenamiento y módulos de enfriamiento, fabricados por empresas como Chart y Linde. A continuación, se describirán características del mercado actual de las estaciones de carga de hidrógeno para vehículos de transporte pesado.

3.3.1 Fabricantes y Características Técnicas

La tabla a continuación lista varios fabricantes y proveedores de estaciones de carga de hidrógeno para vehículos de transporte pesado junto a las características principales de los productos que ofrecen.

Tabla 3-12: Fabricantes y proveedores de estaciones de carga de hidrógeno

Empresa	Tipo Empresa	Producto	Capacidad de suministro (kg/día)	Tasa de dispensación (kg/min)	Presión de Dispensación (bar)	Costo (USD)
Cryo Chains (China)	Fabricante	HRS móviles de H2 gaseoso	Gas	8	350/700	\$ 680.000
Holly Technology (China)	Fabricante	HRS móviles de H2 gaseoso	600	12	350/700	\$ 458.000
Chart Industries (China, USA)	Fabricante	HRS fijas/móviles de H2 gaseoso/líquido	200	8	350/700	N/I
Linde (UK)	Fabricante	HRS fijas/móviles de H2 gaseoso/líquido	1.000 (fijas)	10	350/700	N/I
Air Products (USA)	Fabricante	Dispensador	-	N/I	350/700	N/I
Houpu (China)	Fabricante	HRS tipo container para instalaciones fijas H2 líquido	1000	N/I	700	N/I
Millenium Reign Energy (USA)	Fabricante	HRS escalable para instalaciones móviles y fijas	200	N/I	350/700	N/I
Shijiazhuang Enric Gas Equipment Co., Ltd. (China)	Fabricante	HRS móviles de H2 gaseoso	500	N/I	350	N/I

Empresa	Tipo Empresa	Producto	Capacidad de suministro (kg/día)	Tasa de dispensación (kg/min)	Presión de Dispensación (bar)	Costo (USD)
Shijiazhuang Enric Gas Equipment Co., Ltd. (China)	Fabricante	HRS móviles de H2 gaseoso	200	8	350	N/I
PDC Machines (USA)	Fabricante	HRS fijas de H2 gaseoso/líquido	2500	N/I	350/700	N/I
NEL Hydrogen	Fabricante	HRS modulares	N/I	N/I	350/700	N/I
Plug Power	Fabricante	HRS	N/I	N/I	350	N/I
Accelera (USA)	Fabricante	Elementos	N/I	N/I	N/I	N/I
Black & Veatch (USA)	Distribuidor	Proyectos llave en mano	N/I	N/I	N/I	N/I
Sera (Alemania)	Fabricante	HRS modulares	N/I	N/I	N/I	N/I

Fuente: Elaboración propia a partir de las páginas web de cada fabricante.

Se observa que al final de la Tabla 3-12 aparecen una serie de proveedores de los que se tiene menos información de los anteriores. De estos proveedores, se conoce desde sus páginas web que fabrican y/o distribuyen estaciones de carga de hidrógeno para vehículos de transporte pesado, o fabrican elementos de estas como compresores o dispensadores. Otras, desarrollan proyectos llave en mano, personalizados según necesidad. Se han agregado sus nombres pues también son actores relevantes del mercado de los sistemas de carga, sólo que se dispone de menos información específica de sus productos.

3.3.2 Costos

Se observó en el subcapítulo previo que se pudieron obtener costos relativamente precisos sólo para algunos proveedores. Estos valores pudieron conseguirse debido a que estos fabricantes publican sus precios en la plataforma china de mercado mayorista Alibaba [53]. Esta plataforma permite al proveedor modificar sus precios en función de lo personalizable que sea la solución, por lo que los valores ilustrados deben considerarse como referenciales. Por otro lado, y tal como con los vehículos mismos, a la fecha no se han podido obtener cotizaciones de estaciones de carga de hidrógeno de otros fabricantes, lo que parece en realidad bastante lógico pues muchos de estas instalaciones se han desarrollado a modo de proyecto in situ, ensamblando las partes, las que, para esas instancias se han comprado por separado. En general, existe un problema de información para la estimación de los costos capitales de una instalación de este tipo, pues generalmente estos dependen de la localización de la instalación, tamaño de esta, y aspectos regulatorios locales, entre otros. Además, muchos fabricantes e instaladores ocultan dichos costos por razones de competitividad.

A pesar de esto, la poca información disponible puede complementarse con los valores analizados por el NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable, por sus siglas en inglés) en su estudio “*Levelized Cost of Dispensed Hydrogen for Heavy-Duty Vehicles*” [54]. En este estudio, los autores analizaron una estación de carga con dispensación de hidrógeno gaseoso a 700 bar. La Tabla 3-13 indica los costos analizados por los autores. Los

resultados se muestran con datos estudiados del 2022, y para hidrógeno gaseoso y líquido distribuido a la estación de carga.

Tabla 3-13: Costos analizados por capacidad de dispensación

Capacidad nominal de dispensación	Estación de GH2 en el sitio (dispensación a 700 bar) (2022\$)	Estación de LH2 (dispensación a 700 bar) (2022\$)
Costo de capital (\$2022)		
(2 MTPD)	\$11,0 millones (\$5.500/kg-día)	\$5,92 millones (\$2.960/kg-día)
(4 MTPD)	\$20,7 millones (\$5.170/kg-día)	\$10,9 millones (\$2.730/kg-día)
(8 MTPD)	\$30,3 millones (\$3.790/kg-día)	\$14,5 millones (\$1.810/kg-día)
(18 MTPD)	\$45,4 millones (\$2.520/kg-día)	\$24,0 millones (\$1.330/kg-día)
Costo operativo (\$2022)		
(2 MTPD) - 30% de utilización	\$619.000/año (incluyendo costos de materia prima)	\$501.000/año (incluyendo costos de materia prima)
(2 MTPD) - 50% de utilización	\$723.000/año (incluyendo costos de materia prima)	\$542.000/año (incluyendo costos de materia prima)
(2 MTPD) - 80% de utilización	\$876.000/año (incluyendo costos de materia prima)	\$602.000/año (incluyendo costos de materia prima)
(4 MTPD) - 30% de utilización	\$1,17 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$850.000/año (incluyendo costos de materia prima)
(4 MTPD) - 50% de utilización	\$1,38 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$929.000/año (incluyendo costos de materia prima)
(4 MTPD) - 80% de utilización	\$1,68 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$1,04 millones/año (incluyendo costos de materia prima)
(8 MTPD) - 30% de utilización	\$1,81 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$1,13 millones/año (incluyendo costos de materia prima)
(8 MTPD) - 50% de utilización	\$2,17 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$1,28 millones/año (incluyendo costos de materia prima)
(8 MTPD) - 80% de utilización	\$2,70 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$1,50 millones/año (incluyendo costos de materia prima)
(18 MTPD) - 30% de utilización	\$2,96 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$1,88 millones/año (incluyendo costos de materia prima)
(18 MTPD) - 50% de utilización	\$3,64 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$2,21 millones/año (incluyendo costos de materia prima)
(18 MTPD) - 80% de utilización	\$4,65 millones/año (incluyendo costos de materia prima)	\$2,71 millones/año (incluyendo costos de materia prima)

Fuente: Elaboración propia a partir de [54]

Se observan de la tabla los costos estimados, tanto de capital como operativos, para estaciones de carga de hidrógeno gaseoso (GH2) y líquido (LH2) a 700 bar, dependiendo de la capacidad nominal de producción (en toneladas métricas por día, MTPD) y el nivel de utilización. Se observan varias tendencias que permiten inferir diferencias entre las tecnologías y escalas.



Primero, se observa que los costos de capital disminuyen en términos de costo por kilogramo de capacidad diaria a medida que aumenta la escala de producción, lo que refleja economías de escala. Por ejemplo, el costo de capital por kilogramo-día para una estación de GH2 pasa de \$5.500 a \$2.520 al aumentar la capacidad de 2 MTPD a 18 MTPD. Las estaciones de LH2 tienen consistentemente costos más bajos que las de GH2, lo cual podría deberse a diferencias en la tecnología requerida para manejar hidrógeno líquido frente al gaseoso. Los costos operativos por su parte, muestran una relación directa con el nivel de utilización. A menor utilización (30%), los costos operativos son más bajos, pero proporcionalmente más altos por kilogramo de hidrógeno dispensado. A mayor utilización (80%), los costos totales aumentan, pero la eficiencia mejora significativamente debido a una mejor distribución de costos fijos.

Las estaciones de LH2 tienen costos de capital y operativos inferiores en todas las capacidades y niveles de utilización. Por ejemplo, para una capacidad de 18 MTPD y una utilización del 80%, el costo operativo de una estación de GH2 es de \$4.65 millones al año, mientras que una estación de LH2 cuesta \$2.71 millones. Esto sugiere que, aunque las estaciones de LH2 requieren equipos especializados para manejar hidrógeno en estado líquido, la tecnología parece más eficiente en términos económicos.

Se puede observar el impacto de la economía de escala es evidente en ambas tecnologías. Las estaciones más grandes (18 MTPD) tienen costos unitarios significativamente menores en comparación con las estaciones pequeñas (2 MTPD), tanto en términos de capital como de operación. Este efecto es más pronunciado en estaciones de LH2, donde el costo por kilogramo-día se reduce drásticamente a medida que aumenta la capacidad.

Un análisis de los datos estudiados por los autores sugiere que la elección entre GH2 y LH2 podría depender del contexto. Las estaciones de LH2 parecen ser más económicas y podrían ser preferibles para aplicaciones de alta capacidad y utilización, como grandes redes de transporte. Sin embargo, las estaciones de GH2 podrían ser más prácticas en ubicaciones con menor capacidad o donde no sea viable manejar hidrógeno líquido.

3.3.3 Ubicación de Fabricantes

Los principales fabricantes de estaciones de carga de hidrógeno para vehículos pesados se concentran en países que han adoptado políticas ambiciosas para reducir las emisiones de carbono y promover la movilidad con hidrógeno.

- **Asia:** Japón y Corea del Sur son líderes en el desarrollo de estaciones de carga de hidrógeno, con fabricantes como *Kawasaki Heavy Industries* y *Hyundai Mobis*. Japón, impulsado por su estrategia de la "sociedad del hidrógeno", ha desplegado una red significativa de estaciones para apoyar su industria automotriz. En Corea del Sur, el gobierno ha trabajado estrechamente con empresas para expandir la infraestructura de carga y liderar el mercado global de vehículos pesados de hidrógeno. China, además, es un mercado clave, donde fabricantes como *SinoHytec* y *Beijing SinoHytec* entre otros, están avanzando rápidamente en el desarrollo de estaciones para vehículos pesados. El gobierno chino ha priorizado el hidrógeno como parte de su estrategia de transición energética, especialmente para aplicaciones industriales y de transporte pesado.
- **Europa:** Alemania y los Países Bajos son epicentros de la fabricación y desarrollo de estaciones de hidrógeno en Europa. Empresas como *Linde*, *Nel Hydrogen* (Noruega), y *H2 MOBILITY* tienen una fuerte presencia en la región. Alemania, en particular, lidera con una red bien desarrollada de estaciones gracias a sus iniciativas nacionales de descarbonización. Los Países Bajos, por su parte, están invirtiendo en infraestructura para vehículos pesados debido a su papel como centro logístico en Europa.
- **América del Norte:** Estados Unidos cuenta con importantes fabricantes de estaciones de carga como *Plug Power* y *Air Products and Chemicals*, con una fuerte concentración en California, donde las políticas estatales han incentivado el desarrollo de una red de hidrógeno. Canadá también es un actor relevante, con empresas como *Ballard Power Systems*, que colaboran en el despliegue de infraestructura tanto a nivel nacional como internacional.



Se observa en la Figura 3-20 que las regiones mencionadas son consistentes con los lugares donde se encuentran la mayor cantidad de estaciones de carga instaladas, lo que plantea la interrogante de cuáles serán los desafíos encontrados en América del Sur cuando se comience a desear la instalación de más estaciones de carga, con los fabricantes encontrándose en regiones tan alejadas. Ciertamente, será un desafío a considerar.



Figura 3-20: Cantidad de estaciones de carga por región global

Fuente: [55]

4 Análisis de Brechas a Nivel Nacional y Barreras de Entrada al País

El objetivo de este capítulo se centra en realizar un análisis de las brechas y barreras que se observan a nivel nacional para la implementación del hidrógeno verde en transporte de carga y pasajeros, poniendo foco en temas relacionados con las dificultades de importación, infraestructura, financieras, tiempo de ejecución, entre otros.

La metodología planteada para cumplir estos objetivos consiste en el análisis de la cadena de valor de la movilidad pesada con H2V, lo que incluye el desarrollo y explotación de proyectos. Esta cadena de valor se puede mostrar gráficamente de la siguiente forma:



Figura 4-1: Etapas clave en la cadena de valor de H2V

Fuente: [56]

Cada una de estas etapas se puede definir de la siguiente forma:

- **Producción:** Incluye diversas tecnologías como la electrólisis del agua (hidrógeno verde), gasificación de biomasa, y otros métodos como la fotocatalisis y la fermentación. La producción de hidrógeno se clasifica en diferentes "colores" según la fuente de energía utilizada y el proceso de producción. En este estudio interesa particularmente el hidrógeno verde
- **Transporte:** Se realiza a través de tres modos fundamentales: como hidrógeno gaseoso, como hidrógeno líquido criogénico, y mediante portadores de hidrógeno sólidos o líquidos. La elección del modo de transporte depende de la demanda y la distancia a cubrir.
- **Almacenamiento:** El hidrógeno puede ser almacenado en forma gaseosa, líquida o en materiales sólidos, lo que es crucial para su manejo y utilización eficiente.
- **Uso Final:** El hidrógeno se utiliza en diversas aplicaciones, incluyendo como combustible en vehículos de celda de combustible, como hidrógeno puro o derivados en vehículos con motores apropiados para su combustión directa, en procesos industriales y para la generación de energía.

Es posible identificar una serie de ventajas y desventajas en la utilización de hidrógeno verde. Por ejemplo, la gran fortaleza de utilizar este tipo de hidrógeno recae en las emisiones nulas de CO₂ en su producción. Sin embargo, un gran contra que se puede presentar es el costo y la disponibilidad de energías renovables para lograr que su producción sea completamente limpia.

Cada uno de los aspectos identificados en este análisis se revisarán en detalle a continuación.

Estas características son presentadas a través del siguiente análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) para cada una de las etapas de la cadena de valor del hidrógeno.

4.1 Producción de Hidrógeno Verde

Para realizar una implementación de hidrógeno verde en el transporte es necesario contar con un suministro suficiente para atender la demanda, considerando además que ésta tiene una dimensión espacio temporal, es decir, debe estar en un lugar y en un momento específicos tales que permitan el abastecimiento de los vehículos.

En el siguiente cuadro se presenta un análisis FODA del proceso de producción de hidrógeno verde.

Tabla 4-1: Análisis FODA en fase de producción del hidrógeno verde

Fortalezas (Ventajas)	Debilidades (Desventajas)
<p>El hidrógeno verde se produce utilizando fuentes de energía renovables, lo que contribuye a reducir las emisiones de carbono y apoya los objetivos de sostenibilidad.</p> <p>Hay varios métodos de producción disponibles, incluida la electrólisis del agua, que se puede escalar para aplicaciones de gran tamaño.</p> <p>Chile posee gran potencial para la generación de energías renovables.</p>	<p>El costo de producir hidrógeno verde mediante electrólisis es actualmente más alto que el del hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, lo que lo hace menos viable económicamente.</p> <p>El acceso a agua para electrólisis no siempre está garantizado, especialmente en un contexto de escasez hídrica nacional.</p>
Oportunidades	Amenazas (Barreras)
<p>Los avances en la tecnología de electrolizadores y la eficiencia energética renovable podrían reducir los costos de producción y aumentar la adopción.</p> <p>Oportunidad para Chile de convertirse en exportador e impulsar desarrollo económico y tecnológico.</p> <p>Diversificación de matriz energética nacional.</p>	<p>La necesidad de una inversión significativa en infraestructura y desarrollo tecnológico.</p> <p>No disponibilidad de recurso hídrico requerido para producción de hidrógeno verde.</p> <p>Conflictos ambientales generados en lugares de producción.</p>

Fuente: Elaboración propia

En el país existe una estrategia nacional de hidrógeno verde que pretende crear un marco que permita el desarrollo de una industria de hidrógeno verde, facilitando la coordinación entre el sector público y privado para superar barreras y fomentar la inversión en tecnologías y proyectos relacionados. En este sentido el contar con un plan nacional permite proyectar las inversiones necesarias para cumplir con estos objetivos.

4.2 Almacenamiento

Una vez que el hidrógeno es producido debe ser almacenado, para lo cual existen distintas tecnologías las cuales tienen asociados desafíos importantes. En el siguiente cuadro se realiza un análisis FODA sobre el almacenamiento del hidrógeno.

Tabla 4-2: Análisis FODA en fase de almacenamiento del hidrógeno verde

Fortalezas (Ventajas)	Debilidades (Desventajas)
<p>El hidrógeno se puede almacenar en diversas formas (por ejemplo, gas comprimido, hidrógeno líquido), lo que permite flexibilidad en las soluciones de almacenamiento.</p> <p>Alta densidad energética por unidad de masa (33.3 kWh/kg versus 11.9 kWh/kg en Diesel [24])</p>	<p>El almacenamiento de hidrógeno requiere materiales y tecnologías avanzadas para evitar problemas como fugas y fragilización.</p> <p>Existen pérdidas por evaporación cuando se almacena en forma líquida.</p> <p>Baja densidad energética volumétrica (0.75 kWh/l en estado gaseoso comprimido a 30MPa o 2.36 kWh/l en estado líquido versus 10 kWh/l en Diesel [24])</p>
Oportunidades	Amenazas (Barreras)
<p>El desarrollo de nuevos materiales y tecnologías para el almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno podría mejorar la viabilidad del hidrógeno como portador de energía.</p>	<p>Seguridad relacionada con el almacenamiento y la manipulación del hidrógeno. Gas inflamable.</p> <p>Falta de regulación específica. En la actualidad normativa nacional incluye al hidrógeno de forma genérica como sustancia peligrosa.</p>

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla, las amenazas se identifican por los riesgos del almacenamiento y manipulación de hidrógeno además de la falta de regulación específica para ello [57].

4.3 Transporte

El transporte de hidrógeno enfrenta varios problemas y desafíos que deben ser considerados para su implementación efectiva y segura. La siguiente tabla muestra un análisis FODA del proceso de transporte del hidrógeno:

Tabla 4-3: Análisis FODA en fase de transporte del hidrógeno verde

Fortalezas (Ventajas)	Debilidades (Desventajas)
<p>El hidrógeno se puede transportar a través de distintos métodos, incluidas tuberías, camiones y barcos, lo que proporciona flexibilidad en la distribución.</p>	<p>El transporte de hidrógeno, especialmente en forma gaseosa, puede ser menos eficiente y más costoso en comparación con otros combustibles.</p> <p>Los sistemas de alta presión utilizados para el transporte de hidrógeno gaseoso requieren sofisticados materiales y tecnologías para garantizar la seguridad, así como un consumo energético</p>

	<p>adicional para mantener la presión de manera constante.</p> <p>Por otro lado, el almacenamiento líquido implica licuar el hidrógeno mediante un enfriamiento criogénico a temperaturas alrededor de -253°C. La licuefacción es un proceso que consume una cantidad significativa de energía y requiere infraestructuras especializadas para mantener el hidrógeno en estado líquido. Adicionalmente, existen pérdidas por evaporación cuando se transporta en forma líquida, junto con riesgos de explosión debido a diferencias de temperatura.</p>
Oportunidades	Amenazas (Barreras)
<p>Las innovaciones en las tecnologías de transporte, como los portadores de hidrógeno líquido y el amoníaco como portador de hidrógeno, podrían mejorar la eficiencia del transporte.</p>	<p>Falta de una infraestructura integral de transporte de hidrógeno y los altos costos asociados con el desarrollo de nuevos sistemas de transporte.</p> <p>Falta de regulación específica. En la actualidad normativa nacional incluye al hidrógeno de forma genérica como sustancia peligrosa.</p>

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en el cuadro de amenazas se reconoce la falta de una infraestructura integral y el alto costo de los sistemas de transporte de hidrógeno. Además, la regulación actual sobre el transporte de hidrógeno en Chile es considerada insuficiente para manejar un aumento significativo en el volumen de hidrógeno que se transportaría, debido a la inexistencia de una normativa específica aplicable al hidrógeno quedando resuelto como parte del decreto 298/2002 que se aplica a las sustancias peligrosas y no abordan adecuadamente las particularidades del hidrógeno como combustible [58]. Las limitaciones normativas se abordan en profundidad en el capítulo 5.

4.4 Uso Final

Una vez que se han subsanado las etapas de producción, almacenamiento y transporte, debe implementarse una red de carga que le permita a los consumidores finales acceder al hidrógeno como combustible. Para el caso del uso final se tiene el siguiente análisis FODA:

Tabla 4-4: Análisis FODA en fase de utilización del hidrógeno verde

Fortalezas (Ventajas)	Debilidades (Desventajas)
<p>Energía cero emisiones netas de producción interna aprovechando los recursos del país.</p> <p>Alineación con compromisos de descarbonización del país. Ventajas importantes</p>	<p>El mercado actual de utilización del hidrógeno aún está en desarrollo y existe competencia de otras tecnologías bajas en carbono.</p>

<p>en situaciones donde la electrificación aún presenta dificultades, por ejemplo, transporte de largas distancias u operación continua.</p> <p>El hidrógeno verde se puede utilizar en diversas aplicaciones, incluidos vehículos de transporte eléctricos con celdas de combustible (FCEV) y procesos industriales, lo que contribuye a la reducción de emisiones.</p>	<p>El costo del hidrógeno verde es aún alto en relación a los combustibles tradicionales y en relación al hidrógeno gris y azul.</p>
<p>Oportunidades</p> <p>La creciente demanda de soluciones bajas en carbono en el transporte y la industria presenta oportunidades para la adopción del hidrógeno.</p> <p>Reconversión de procesos industriales que hoy contaminan y donde la electrificación presenta dificultades de implementación.</p> <p>Reutilización de infraestructura en aplicaciones del tipo “blending”.</p>	<p>Amenazas (Barreras)</p> <p>Dependiendo el tipo de uso, existen desafíos regulatorios que podrían impedir el crecimiento del mercado del hidrógeno.</p>

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en el cuadro de amenazas, el principal desafío que se plantea es el regulatorio. En particular en el país existen estudios que hacen propuestas regulatorias debido a la falta de normativas en el país [57].

El hidrógeno verde se considera el tipo de hidrógeno más conveniente para producir, debido principalmente a que se genera utilizando fuentes de energía renovables, lo que se alinea con los esfuerzos globales para reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático. Así, dentro de las razones para la conveniencia de esta producción se encuentran la sostenibilidad, la transición energética y su versatilidad. Sin embargo, es importante tener presente los grandes desafíos y contras que se presentan en su producción tales como:

1. Disponibilidad y costo de las energías renovables involucradas: El precio de la electricidad generada a partir de energías renovables impacta significativamente en el costo total de producción del hidrógeno verde.
2. Escasez de agua: La disponibilidad de recursos de agua también impacta en los costos ya que es crucial para generar electrólisis. Asimismo, la calidad del agua disponible o procesos de purificación necesarios pudiesen adicionar costos.
3. Tecnología del electrolizador: El tipo y eficiencia de la tecnología usada en el electrolizador puede afectar los costos de producción.

Esto hace que la fase más importante en la cadena de valor del hidrógeno verde sea la producción, ya que influencia directamente el costo, la disponibilidad y la sustentabilidad del hidrógeno verde.

4.5 Brechas y Barreras en el Uso del Hidrógeno en Transporte

La cadena de valor en transporte de pasajeros o carga puede ser presentada considerando dos componentes principales que corresponden a transporte y energía. En el documento “Understanding how the value chains of

e-bus public transport work for six European regions“ [59], se hace un análisis para el caso de la cadena de valor de transporte de pasajeros en vehículos eléctricos que presenta una misma estructura que en el caso del H2V, lo que se puede ver en la siguiente figura:

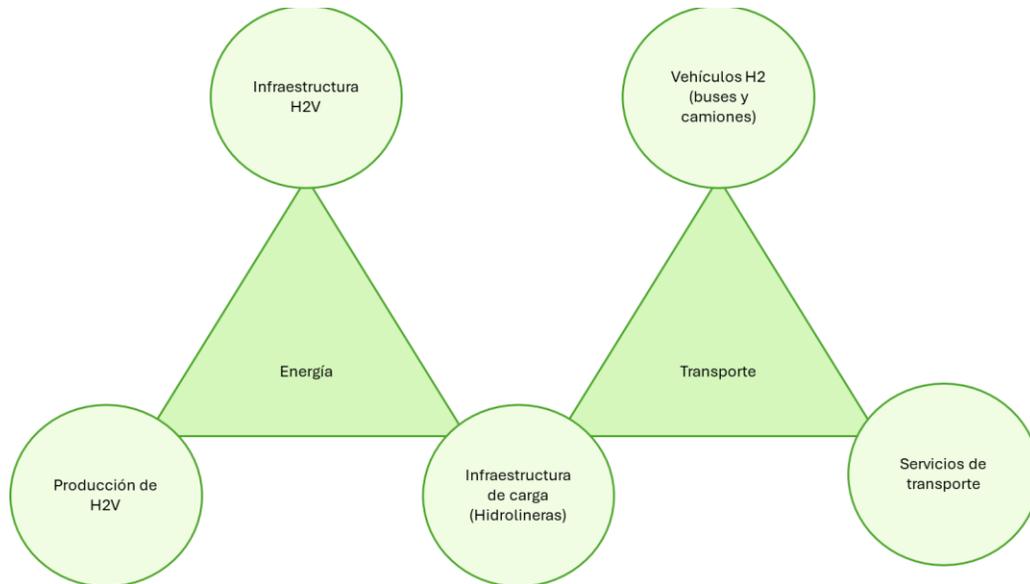


Figura 4-2: Etapas clave en la cadena de valor de H2V para transporte

Fuente: Elaboración propia en base a [59]

Es decir, un sistema de transporte ya sea de carga o pasajeros debe contar con producción de H₂, infraestructura de distribución y almacenamiento, e infraestructura de carga para abastecimiento de los vehículos. Las estaciones de carga corresponden al punto de interacción entre el componente de la energía y el de transporte. En el caso del transporte de pasajeros, se tiene una variedad de servicios que van desde servicios urbanos, transporte público mayor (buses), transporte colectivo, taxis, buses interurbanos, buses rurales, transporte de personal, entre otros.

Para el caso de la carga existen diversas formas de clasificación en función del tipo de carga, el tipo de servicio, el tipo de camión, la masa máxima autorizada y la carrocería.

En este contexto, es fundamental tener en cuenta que el tipo de servicio de transporte que se planea ofrecer determina el tipo de vehículo que se debe adquirir. Actualmente, la disponibilidad de vehículos impulsados por hidrógeno, tanto para transporte de carga como de pasajeros, se encuentra en una etapa de desarrollo, lo que limita las opciones disponibles y condiciona la elección según las características del servicio. Si se analiza la oferta de buses predominan los buses de 12 metros, homologables a un bus B2 de la regulación actual. Estos buses están predominantemente pensados para servicios urbanos, con autonomías que van desde los 200 km hasta los 1030km (GB KITE DF FCEV de Wright con estanque de 50kg de hidrógeno), con precios que rondan entre los €450.000 a €650.000.

En el caso de los camiones existen 10 modelos disponibles en el mercado (ver Tabla 3-8) y otros 12 modelos en etapa de desarrollo o en pruebas. Los modelos que están disponibles poseen diferentes características de longitud, entre 8 y 16 metros, pesos brutos vehiculares entre las 30 y las 65 toneladas y autonomías entre 200 y 1500km. Los precios están en un rango entre US\$312.000 a US\$630.000 (Sharpe & Basma, 2022).

En este sentido, aunque aún existe escasa oferta de camiones en el mercado, existe la posibilidad de importar vehículos y sus principales barreras pasan por los costos de importación y cuestiones regulatorias que se abordan en el capítulo siguiente.

Para evaluar una operación de un vehículo que use H₂ se debe contar con una red de carga que permita suministrar el combustible. En general el acceso a combustibles fósiles es fácil considerando que el país posee una extensa red de estaciones de servicio de combustibles tanto en sectores urbanos como en las principales carreteras del país. En el caso de los vehículos eléctricos, la red de electrolineras públicas presenta 315 puntos de carga en el país con al menos un punto en cada región [60]. Por el contrario, en el caso del hidrógeno y su aplicación en el transporte, solo existe una hidrolinera que además no está abierta a todo público y forma parte de una experiencia piloto [31], más un proyecto de nueva hidrolinera de Copec, también de tipo piloto a instalarse en dependencias de Walmart para uso en camiones de alto tonelaje [50].

Si se analiza exclusivamente la provisión de servicios de transporte con vehículos que utilicen hidrógeno, la inexistencia de una red densa de provisión es una barrera importante para implementar algún servicio. En el caso de los buses eléctricos implementados en licitaciones recientes (Antofagasta, Coquimbo, Gran Santiago), el enfoque ha sido la instalación de cargadores en los depósitos de los buses. Es posible pensar que este mismo enfoque se adopte para buses que funcionen con hidrógeno lo que acarrea otros desafíos desde el punto de vista de la inversión en infraestructura, seguridad y normativos.

En el caso del transporte de carga, lo esperable es la instalación de hidrolineras en los depósitos de los camiones o en lugares donde existan rutas recurrentes que no exijan contar con una red de hidrolineras sino con puntos de recarga.

En las subsecciones siguientes, se revisan cada una de las brechas y barreras identificadas para el uso del hidrógeno en transporte, las cuales han sido clasificadas en económicas y financieras, institucionales y regulatorias, técnicas y de infraestructura, sociales y ambientales y de capital humano.

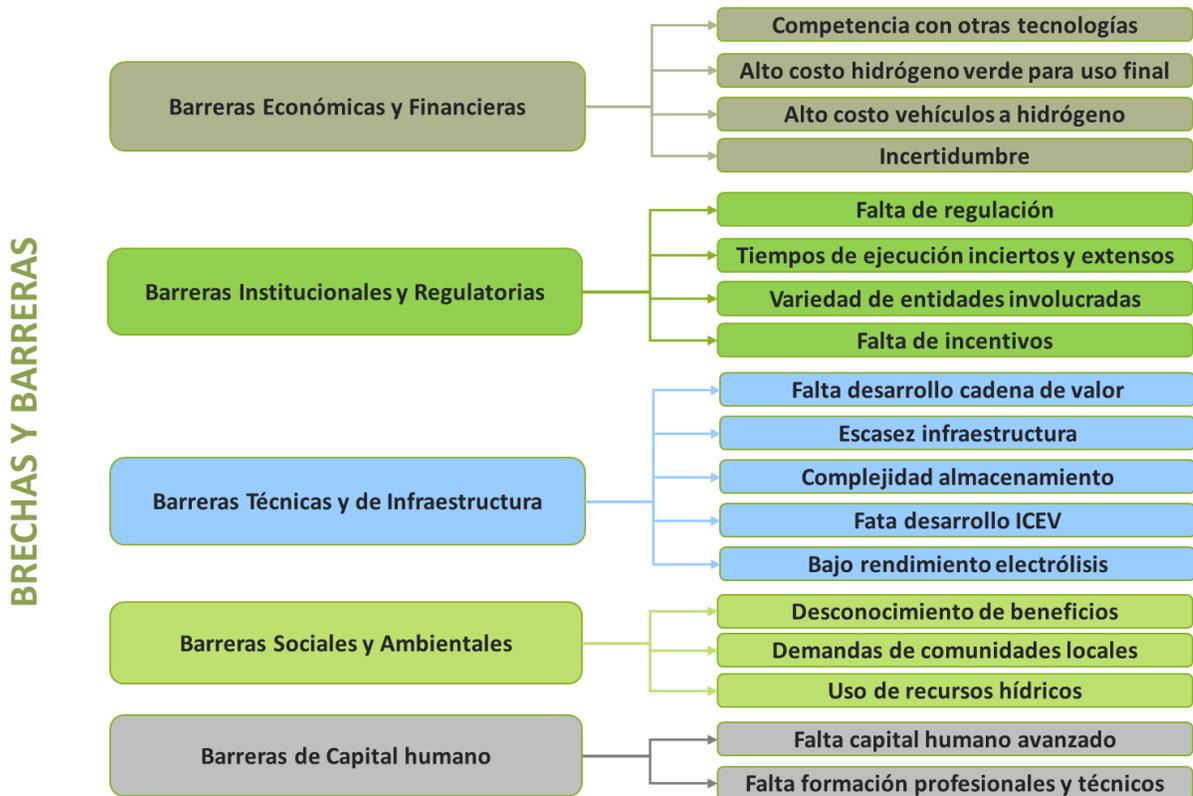


Figura 4-3: Barreras en el uso de hidrógeno en transporte

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Barreras Económicas y Financieras

La introducción del hidrógeno verde en el sector transporte de Chile enfrenta diversas barreras económicas y financieras, las cuales pueden resumirse en los siguientes puntos:

- **Competencia con otras tecnologías, en particular con el uso de combustibles fósiles.**

En primer lugar, es posible identificar una barrera económica dada por el uso de las tecnologías ya existentes en el sector de transporte en Chile. En particular los combustibles fósiles como el diésel y la gasolina, quienes ya son utilizados por los diversos sistemas de transporte en el país, y presentan costos más bajos en comparación con el hidrógeno verde. Esto da lugar a que sus precios sean competitivos y que dificulte la adopción de nuevas tecnologías como el H2V en el mercado del transporte. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que según lo establecido por el artículo 2 de la Ley N°19.764, las empresas de transporte de carga que sean propietarias o arrendatarias con opción de compra de camiones de un peso bruto vehicular igual o mayor a 3.860 kg, pueden recuperar un 25% del impuesto específico al Diesel establecido en el artículo 6 de la LeyN°18.502, donde además se considera un impuesto específico menor al Diesel que a las gasolinas.

Asimismo, el uso de vehículos eléctricos con batería (BEV) están en una etapa de desarrollo más avanzada y en el país se cuenta con una infraestructura de carga en expansión, lo que los hace más atractivos para su uso en comparación con los vehículos de hidrógeno.

- **Alto costo del hidrógeno verde para su uso final.**

En la actualidad, la producción de hidrógeno verde no es competitiva, aunque Chile posee condiciones favorables para su producción. Los costos actuales se estiman entre 3 y 7,5 USD/Kg, considerablemente superior al hidrógeno producido en base a gas natural (0,9 – 3,2 USD/Kg). Sin embargo, se espera que este costo disminuya en un 30 % para 2030 como resultado de la disminución de los costos de la energía renovable, lo que mejoraría su competitividad [61].

- **Alto costo de producción, operación y mantenimiento de vehículos que usan hidrógeno verde como combustible.**

Los vehículos de celda de combustible de hidrógeno (FCEV) presentan precios de producción significativamente más altos en comparación con los vehículos convencionales o eléctricos con batería. A su vez, si bien el costo de operación es más bajo que para un auto a gasolina, sigue siendo muy superior a un vehículo eléctrico, llegando a ser hasta 8 veces más caro como por ejemplo en España [62]. Sumado a esto, tal como ocurrió con los vehículos eléctricos años atrás, aún no existe una red de puntos de carga de hidrógeno desarrollada en el país, lo que incrementa los costos operativos y logísticos para su uso, y desincentiva su adopción [63]. Esta nueva tecnología, al estar aún en vías de desarrollo, requiere un mantenimiento especializado, lo que puede traducirse en costos adicionales y menor disponibilidad de talleres capacitados. Los vehículos a hidrógenos introducen nuevos componentes en la mantención no presentes en los vehículos eléctricos. Por ejemplo, la necesidad de inspección de los tanques de almacenamiento, detección de fugas (especialmente crítico si el hidrógeno es gaseoso), revisión de filtros, conexiones desde el sistema de carga y, en caso de que las celdas sean de membrana, revisión de presencia de residuos sólidos en estas.

- **Incertidumbre**

Por último, todas estas barreras económicas del hidrógeno verde en el país producen incertidumbre, la cual se materializa en un riesgo de inversión en tecnología emergente. Como la industria del hidrógeno verde aún se encuentra en desarrollo, genera incertidumbre entre los inversionistas debido a la falta de precedentes y garantías de rentabilidad, lo que puede inhibir la inversión privada y dificultar el crecimiento y la expansión del mercado del hidrógeno verde en el país [61]. Sumado a esto, la demanda y los precios del hidrógeno verde en el mercado internacional aún son volátiles, como se mencionó anteriormente, lo que afecta la estabilidad financiera de los proyectos relacionados.

Para superar estas barreras económicas y financieras se requiere que existan políticas públicas que fomenten la inversión en infraestructura, subsidios que reduzcan los costos iniciales y campañas de concientización que promuevan los beneficios del hidrógeno verde en el transporte.

4.5.2 Barreras Institucionales y Regulatorias

Si bien hoy es posible la importación de esta tecnología, mientras otros temas relacionados especialmente con la falta de regulación e incentivos al respecto, dificulta enormemente la implementación de vehículos a hidrógeno.

- **Falta de regulación**

En Chile no existe un marco regulatorio claro y específico que facilite la integración del hidrógeno verde en el transporte y garantice estándares de seguridad. Esto hace que la introducción de esta tecnología enfrente diversas barreras institucionales y regulatorias que dificultan su desarrollo e implementación efectiva.

Una de las principales barreras es, precisamente, la **falta de normativas específicas** para el hidrógeno verde. Actualmente, Chile carece de una regulación detallada que facilite la integración del hidrógeno verde en el sector de transporte [64]. Esta inexistencia de normativas claras dificulta la implementación de medidas de seguridad



específicas para cada una de las etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde en el sector [65], y a su vez representa un obstáculo para su integración dentro de esta cadena.

- **Tiempos de ejecución inciertos y extensos**

Asimismo, los procedimientos actuales para obtener permisos relacionados con proyectos de hidrógeno verde son complejos e inciertos, pudiendo tardar bastante, lo que retrasa la ejecución de proyectos [66].

- **Variedad de entidades gubernamentales involucradas**

Al existir variadas entidades gubernamentales que se ven involucradas en los proyectos de hidrógeno y transporte dificulta una coordinación institucional eficiente y contribuye a la dilación en la aprobación de proyectos [67].

- **Falta de incentivos**

Otra barrera de entrada relacionada con la normativa para regular este tipo de proyectos en Chile tiene que ver con la carencia de políticas públicas de incentivo. No existen subsidios o incentivos fiscales claros para desarrollar proyectos de hidrógeno verde en materia de transporte, lo que desincentiva la inversión en nuevas tecnologías en este sector [43]. Por lo tanto, es fundamental que el Estado chileno desarrolle un marco regulatorio claro y específico que facilite la integración del hidrógeno verde en el transporte, garantizando estándares de seguridad y promoviendo políticas públicas que incentiven su adopción.

En el capítulo 5 se encuentra un análisis que detalla las problemáticas del uso del hidrógeno verde en transporte a nivel normativo en Chile.

4.5.3 Barreras Técnicas y de Infraestructura

A continuación, se presentan las principales barreras identificadas como técnicas y de infraestructura para la introducción del hidrógeno verde en el sector de transporte en Chile:

- **Falta de desarrollo en la cadena de valor del hidrógeno verde.**

Actualmente en Chile no existe un desarrollo completo de la cadena de valor del hidrógeno verde. Desde la producción hasta la distribución y el uso final, cada etapa enfrenta limitaciones técnicas y de infraestructura, lo que dificulta una implementación efectiva en diferentes mercados, y en particular en el sector de transporte, afectando la competitividad y el acceso a la tecnología. A su vez, el bajo nivel de madurez de tecnologías que son fundamentales es una barrera para el desarrollo de una parte de la industria de hidrógeno verde en Chile. La falta de soluciones de utilización de este energético se transforma en un desafío al escalamiento de su demanda y, por tanto, de la creación de su mercado [68]. Chile requiere más avances tecnológicos en producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde, como la mejora de electrolizadores, sistemas de almacenamiento y transporte eficiente, y producir más investigación y desarrollo en este campo para ampliar aún más las posibilidades para una adopción masiva.

Dado lo anterior, la producción de hidrógeno verde en Chile aún se encuentra en una etapa inicial, con proyectos piloto y producción a pequeña escala; por lo que no existen aún grandes economías de escala en este mercado. Esto eleva los costos, dificultando la competitividad frente a otras fuentes de energía, como los combustibles fósiles y la electricidad.

- **Escasez de infraestructura para el suministro de hidrógeno.**

Chile aún no cuenta con una red de estaciones de servicio suficiente (hidrolíneas) para abastecer vehículos de hidrógeno [63]. Esto representa una barrera crítica para la adopción de vehículos impulsados por este combustible, ya que la operación de vehículos de hidrógeno en el transporte público y privado se torna inviable,

y por consiguiente, la falta de una red adecuada de estaciones para el suministro de hidrógeno dificulta su adopción en el sector transporte.

En el país existen algunas iniciativas particulares en curso para implementar hidrolineras en zonas estratégicas, especialmente en áreas donde se espera un alto tráfico de vehículos de hidrógeno, como Santiago y el norte de Chile. Sin embargo, hay sólo dos puntos de recarga de hidrógeno disponibles actualmente, para los pocos vehículos FCEV, ambos en la comuna de Pudahuel. Uno dedicado a vehículos modelo Toyota Mirai y otro dedicado a abastecer al primer bus de hidrógeno que funciona en Chile para faenas mineras de Anglo American, importado por Andes Motor [63].

- **Complejidad de desarrollo de sistemas de almacenamiento**

Como se mencionó en el capítulo 2.4.2, las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, ya sea gaseoso o líquido se encuentran en constante evolución y desarrollo, esto implica normalmente la sucesiva complejidad de acceso o desarrollo de los materiales necesarios y sistemas de diseño. Además, en la actualidad en Chile se encuentran regulados los aspectos de seguridad del almacenamiento de hidrógeno gaseoso, como se verá más adelante, sin embargo, no se espera una regulación en seguridad de almacenamiento de hidrógeno líquido hasta 2029 [67].

- **Falta de desarrollo tecnológico de tecnologías ICEV.**

Como se observó en el capítulo de estado del arte, a nivel internacional existe un bajo desarrollo tecnológico de vehículos con motores de combustión interna a hidrógeno (Internal Combustion Engine Vehicles – ICEV) a diferencia de los vehículos con celdas de combustible que hoy son el estándar más desarrollado y disponible comercialmente.

- **Bajo rendimiento de la electrólisis.**

El desarrollo tecnológico de la electrólisis para producir hidrógeno aún posee rendimientos bajos respecto al máximo teórico con uso de agua dulce, que se reduce aún más con el uso de agua salada. Se espera que avances tecnológicos en los catalizadores, electrolizadores y el uso de membranas más eficientes pueden reducir los consumos de energía eléctrica de este proceso en el futuro.

4.5.4 Barreras Sociales y Ambientales

Chile enfrenta también barreras sociales y ambientales relacionadas con la introducción del hidrógeno verde en el sector transporte en Chile. Estas pueden generar impactos tanto en las comunidades como en los recursos naturales del país. En este aspecto cobra relevancia el concepto de **transición energética justa**, el cual busca que el cambio hacia fuentes de energía renovables se realice con decisiones y beneficios descentralizados, con precios justos, equidad y respeto por el medio ambiente y comunidades locales.

A continuación, se presentan los puntos clave:

- **Desconocimiento de los beneficios del hidrógeno verde.**

Existe una falta de información pública generalizada sobre las ventajas ambientales y económicas del hidrógeno verde, lo que limita su aceptación y apoyo por parte de la ciudadanía [69]. Esta falta de información a su vez puede generar temores infundados sobre la seguridad en el uso y transporte del hidrógeno e incluso oposición a proyectos, sobre todo en Chile que posee una gran cantidad de conflictos socioambientales relacionados con proyectos energéticos. A su vez, existen pocas iniciativas educativas que informen sobre el hidrógeno verde o que promuevan sus beneficios, lo que limita la formación de una opinión pública que apoye su implementación y reduce la conciencia sobre la importancia de la descarbonización.

- **Demandas de las comunidades locales.**

Las comunidades cercanas a los proyectos de producción de hidrógeno verde podrían oponerse debido a preocupaciones sobre posibles impactos ambientales, falta de consulta previa y/o limitada participación en los beneficios económicos. A su vez, esto podría generar conflictos sociales como también retrasos en los proyectos e incluso su paralización.

En particular, uno de los elementos claves a la hora de desarrollar proyectos energéticos con éxito es el manejo de la confianza de la población en las instituciones públicas y privadas. Este aspecto es cada vez más relevante para la gestión de riesgos y, según la literatura, se ha tornado relevante para dar cuenta de un mejor manejo de las externalidades y conflictos socioambientales. En la sociedad chilena, caracterizada por una alta conflictividad socioambiental, generada por proyectos de inversión ligados a la producción y a la distribución de energías, entre otros, esta conflictividad tiende a aumentar debido a la alta demanda de crecimiento económico [70].

A su vez, la construcción de infraestructura para el hidrógeno, como plantas de producción y redes de transporte, al igual que otros proyectos energéticos, podría afectar hábitats naturales y ecosistemas sensibles. Así, se vuelve importante considerar estas condiciones para evitar su rechazo por parte de organizaciones y comunidades locales.

- **Uso de recursos hídricos.**

La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis requiere grandes cantidades de agua, lo que puede ser un desafío en regiones de Chile con escasez hídrica, como el norte del país. Esto podría generar conflictos por el acceso al agua entre las empresas y las comunidades locales, especialmente en zonas que ya enfrentan estrés hídrico.

En particular, Chile experimenta escasez de agua en las regiones identificadas como polos de desarrollo para el hidrógeno verde y de sus derivados. A pesar de que se espera que su producción, en algunos casos, utilice agua de mar, es necesario considerar alternativas equilibradas y sostenibles para obtener agua y minimizar impactos negativos. La producción de 1 kg de hidrógeno a partir de fuentes renovables, además del agua consumida propiamente en la electrólisis, consume entre 17 y 18 L de agua debido a la operación de la planta de energía solar y aproximadamente 2 L debido a la operación de una planta eólica [71].

4.5.5 Barreras de Capital Humano

Por último, la adopción de hidrógeno verde en el sector de transportes en Chile enfrenta varias barreras relacionadas con el capital humano:

- **Falta de capital humano avanzado.**

La industria del hidrógeno verde en Chile requerirá una cantidad significativa de profesionales altamente calificados en los próximos años. Este desarrollo exigirá la construcción y operación de las plantas y tecnologías vinculadas a toda la cadena de valor.

Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, se estima la creación de al menos 100.000 nuevos puestos de trabajo en las próximas décadas, lo que demanda una formación especializada en este ámbito [42]. Por otro lado, algunos estudios se han dedicado a cuantificar la fuerza laboral imprescindible para la transición energética y la industria de hidrógeno verde, lo que puede servir para compararla con la vigente y así determinar la brecha. En particular, la eventual expansión de la industria de hidrógeno en Chile, desde una producción doméstica hacia un mercado internacional, permitiría incrementar a más del triple la creación total de puestos de trabajo al año 2050. En cambio, estimando el escenario de la estrategia nacional, se percibe que este ítem ascendería de 79 mil, a 488 mil, y finalmente a 742 mil para los años 2030, 2040 y 2050, respectivamente [72].

Varias ocupaciones técnicas podrían ser extrapoladas desde industrias y experiencias existentes, mientras que algunos perfiles ocupacionales específicos o sus tecnologías deberán ser creados, debido a la nueva tecnología. Los nuevos trabajadores de esta industria deberán tener el conocimiento y la comprensión de reglamentos, códigos y normativas relacionados con esta tecnología, especialmente en el ámbito de seguridad, debido a sus propiedades físicas y químicas [73].

- **Falta de formación de profesionales y técnicos.**

Otro desafío actual se relaciona con la articulación entre las ofertas formativas de currículums educativos, los requerimientos de la industria energética y la falta de oferta de capacitación continua en el ámbito técnico-profesional. Por esto, el Estado de Chile pretende fortalecer este ítem a través de la estandarización de los perfiles laborales en los niveles de operario, técnico-profesional y la generación de oferta de capacitaciones accesibles y flexibles, con enfoque en la producción de capital humano local [73]. Se necesita que el capital humano en toda la cadena del hidrógeno (producción, manejo y uso) disponga de conocimientos específicos del riesgo asociado para reforzar las habilidades técnicas. A modo de ejemplo, estas competencias incluyen control e ingeniería de procesos específicos para el H₂, comprensión de procesos electroquímicos, capacidad para instalar, solucionar problemas, reparar y mantener equipos asociados a electrolizadores y celdas de combustible, entre otros.

La Comisión del Sistema Nacional de Certificación de Competencias Laborales, Chile Valora, considera tres perfiles relacionados con la industria del hidrógeno verde dentro de su catálogo de competencias laborales: operador(a) en planta de hidrógeno, mantenedor(a) en planta de hidrógeno y supervisor(a) en planta de hidrógeno.

5 Análisis de Problemática a Nivel Normativo

Actualmente, el transporte de carga y pasajeros en Chile depende casi exclusivamente de vehículos a diésel y en menor medida de vehículos eléctricos, cuya normativa y regulaciones están bien definidas. Sin embargo, la adopción de vehículos impulsados por hidrógeno enfrenta una **falta de regulaciones específicas para su homologación y uso**, ya que el país se encuentra en las etapas iniciales del desarrollo de estrategias nacionales para esta fuente de energía.

La falta de regulación que enfrenta el uso del hidrógeno en el país afecta todas las etapas de su cadena de valor [65]. Tradicionalmente, la regulación nacional ha incluido al hidrógeno en forma genérica, siendo regulado por los reglamentos de sustancias peligrosas (gases inflamables) según las responsabilidades sectoriales de cada ministerio o entidad. Esta regulación es insuficiente para aplicaciones energéticas. Así, se tiene lo siguiente:

- El Ministerio de Salud reglamenta el **almacenamiento de sustancias peligrosas** y las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.
- El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones reglamenta el **transporte** por carretera de **sustancias peligrosas** y la manipulación de ellas en recintos portuarios. Adicionalmente, el transporte marítimo está regulado por el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (CMIMP).
- El Ministerio del Trabajo y Previsión Social posee un **reglamento sobre prevención de riesgos** profesionales, que toca tangencialmente al hidrógeno en cuanto obliga al empleador a tener un reglamento interno de seguridad e higiene en el lugar de trabajo, además de informar a los trabajadores sobre los riesgos que corren y a capacitarlos para enfrentarlos adecuadamente.
- SERNAGEOMIN del Ministerio de Minería tiene un reglamento de seguridad minera que podría afectar al hidrógeno en forma indirecta.

Un estudio realizado por el Ministerio de Energía, el Centro de Energía de la UC y GIZ el año 2020 [65], propuso un plan regulatorio a desarrollar en el país para el desarrollo del hidrógeno. Recientemente, en septiembre 2024, el Ministerio de Energía actualizó esta propuesta con el “Plan de Trabajo (PDT) de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030” [66].

Mientras que dicho plan de trabajo se ha ido definiendo, el país ha experimentado algunos avances en el desarrollo regulatorio. En primer lugar, la Ley Nº 21.305, sobre eficiencia energética, promulgada en febrero de 2021, introdujo modificaciones a diversos cuerpos normativos a efectos de incorporar al hidrógeno y a los combustibles obtenidos de él como parte integrante del sector energía.

Asimismo, el Decreto 13 del Ministerio de Energía promulgado en febrero 2022 y publicado en junio 2024, aprobó el **Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno (gaseoso)** e introdujo modificaciones al Reglamento de Instaladores de Gas [74]. Dicho reglamento establece los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las instalaciones de hidrógeno en estado de ser utilizado como recurso energético, en las etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento, reparación, modificación, inspección y término definitivo de operaciones, y en las cuales se realizarán las actividades de producción, acondicionamiento, almacenamiento, transferencia y consumo de hidrógeno. Se establecen, además, las obligaciones y responsabilidades de las personas naturales y jurídicas que intervienen en dichas actividades. Sin embargo, dicho reglamento no considera el hidrógeno líquido ni las siguientes instalaciones:

- Instalaciones surtidoras de hidrógeno para vehículos terrestres, ferroviarios, aéreos o marítimos;



- Redes de transporte y distribución de hidrógeno utilizadas para trasladar el hidrógeno fuera de la instalación de hidrógeno;
- Vehículos que operen con hidrógeno, sean terrestres, ferroviarios, aéreos o marítimos;
- Vehículos, ferrocarriles, naves o aeronaves que transporten hidrógeno.

Según señala el PDT de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030 [66], el inicio del trabajo **reglamentario para instalaciones de hidrógeno líquido** está programada para primer trimestre del año 2029. Adicionalmente, el PDT de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030 [66] identifica las siguientes normativas adicionales necesarias de ser generadas o modificadas para el desarrollo de la industria en el país, indicando la fecha estimada de inicio de la elaboración entre paréntesis:

Normativa que debiese liderar el Ministerio de Energía;

- **Generación de Normas técnicas de calidad para el hidrógeno y de procedimiento de control:** Para garantizar que el hidrógeno cumpla con los requerimientos de calidad que exigen algunas aplicaciones, se requiere estandarizar los parámetros y procedimientos experimentales que darán certeza a la calidad del hidrógeno (segundo trimestre de 2024).
- **Modificación del D.S 132/79 del MINMINERIA que establece normas técnicas de calidad y de procedimiento de control aplicables al petróleo crudo, a los combustibles derivados de este y a cualquier otra clase de combustible:** Esta normativa debiese incorporar aspectos asociados a la comercialización de hidrógeno (primer trimestre de 2025).
- **Modificación D.S 280/09 Minecon que establece el Reglamento de seguridad transporte y distribución de gas de red:** Incorporar a la mezcla de gas natural con hidrógeno como gas de red en una primera instancia (tercer trimestre de 2025) y como hidrógeno puro en una segunda instancia (cuarto trimestre de 2028)
- **Modificación D.S 66/07 Minecon que reglamenta las instalaciones de interiores y medidores de gas:** Incorporar aspectos asociados a la mezcla de gas natural con hidrógeno en redes interiores de gas (tercer trimestre de 2025) e incorporar aspectos asociados al hidrógeno en redes interiores de gas (primer trimestre de 2029).
- **Elaboración Reglamento para las estaciones de dispensado de hidrógeno:** Establecer requisitos técnicos de seguridad en el dispensado de hidrógeno gaseoso a vehículos tanto para vía pública como offroad. Estos aplican a la interface de conexión para dispensado y comunicación con el vehículo, sistema de comunicación, protocolo de llenado y medición de cantidad dispensada (segundo trimestre de 2024)
- **Modificación Ley general de servicios eléctricos: Cambios a la regulación y tarificación de SSMM (sistemas medianos)** para permitir la incorporación de proyectos de hidrógeno (sin fecha indicada de inicio).
- **Modificación del D.S 125/17 MEN que reglamenta la coordinación y operación del sistema eléctrico nacional:** incorporación del tratamiento del sistema de transmisión en instalaciones de generación-consumo, coordinación y despacho de instalaciones de Hidrógeno, provisión de servicios complementarios de las plantas de generación consumo a la red eléctrica, definición del punto de conexión (tercer trimestre 2024).
- **Elaboración Reglamento para las estaciones multcombustible de dispensado público:** Establecer requisitos técnicos para las estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso a vehículos en conjunto con otros combustibles como gasolina, diésel, gas natural, gas licuado de petróleo, kerosene y electricidad. También se considerará la necesidad de protocolos detallados de seguridad y mantenimiento (primer trimestre 2026).

- Elaboración del **Reglamento de calidad de mezcla de gas natural con hidrógeno**: Establecer especificaciones o parámetros de calidad a controlar para la mezcla gas natural con hidrógeno (tercer trimestre 2025).

Normativa que debiese liderar el Ministerio de Salud

- Modificación D.S 43/15 que reglamenta el **almacenamiento de sustancias peligrosas**: Revisar la normativa sanitaria de sustancias peligrosas, analizando la necesidad de cambios a partir del desarrollo de una industria de hidrógeno verde y derivados, en base a nuevo sistema armonizado de clasificación y etiquetado de sustancias, GHS, implementado en el país mediante el D.S. 57/19 (primer trimestre 2025)
- Modificación D.S 594/99 que reglamenta las **condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo**: Se actualiza la totalidad de la normativa, considerando las medidas de seguridad en la manipulación de sustancias químicas presentes en los lugares de trabajo. En el marco de ese trabajo, se analizará si los avances científicos y tecnológicos asociados a la industria del hidrógeno verde que tengan un alcance general ameritan una modificación al reglamento. (ya iniciado, se espera termine a fines de 2025)

Normativa que debiese liderar el Ministerio de Transporte

- Modificación D298/94 MTT que reglamenta el **transporte de cargas peligrosas por calles y caminos**: Se analizará incorporar ajustes puntuales para incorporar el hidrógeno gaseoso y líquido, además de sus derivados como combustibles sintéticos y amoniaco. Se hará un análisis de congruencia regulatoria asociado al ingreso de vehículos desde la vía pública a faenas privadas, específicamente con el DS 132 del Ministerio de Minería y reglamentos de instalaciones del Ministerio de Energía. También se considerará la experiencia de la industria en el trabajo a realizar (tercer trimestre 2025)
- Elaboración regulación para **certificado de homologación de vehículos nuevos**: analizar la pertinencia y exhaustividad de las regulaciones de referencia actuales para el otorgamiento de homologaciones y definir necesidad de modificación y/o elaboración de nuevos cuerpos. Se señala que inicialmente se tendrán en consideración los siguientes antecedentes: ISO 19880-1 Gaseous hydrogen— Fuelling stations y NFPA 2 capítulo 10 GH2 Vehicle Fueling Facilities (tercer trimestre 2025).

Asimismo, el PDT señala que no es claro que la transformación de vehículos de combustión interna a hidrógeno deba normarse a través de decretos supremos, decretos exentos o resoluciones, por lo que el MTT iniciará un proceso de diálogo con el sector privado para entender en profundidad su necesidad y determinar las acciones necesarias para permitir estas actividades.

En el caso de retrofit de vehículos de combustión interna a eléctricos, desde el año 2020 en Chile existe un proyecto de ley para autorizar y regular la circulación de vehículos livianos y medianos modificados para utilizar, como único medio de propulsión, motores eléctricos que sin embargo no ha visto la luz. El año 2022 el MTT emitió el Decreto 62 para el “Reglamento que Establece Requisitos para Transformación de Vehículos Propulsados por motor de combustión interna a propulsión eléctrica y modifica D.S156/1990 del MTT”, sin embargo, este decreto fue observado por la Contraloría General de la República señalando que el MTT no contaba con las facultades para autorizar talleres de reconversión. Actualmente se está tramitando en la Cámara de Diputados el boletín 17242-15 que "Modifica la ley N° 18.290, de Tránsito, con el objeto de facultar al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones para autorizar establecimientos o talleres que realicen transformación de sistemas de propulsión de

combustión interna a eléctricos, y otras adaptaciones, a vehículos motorizados en uso. Es necesario tener presente sin embargo que esta modificación legal no permitirá aplicar dicha normativa para la reconversión hacia vehículos a hidrógeno.

Según lo indicado por Reborn Electric Motors, esta empresa ha realizado reconversiones bajo el alero del Decreto 67 de 2021 del MTT, que estableció un reglamento para la realización de proyectos experimentales o pilotos. Este reglamento define proyectos experimentales o piloto aquellas actividades, vinculadas entre sí, necesarias para evaluar la aplicación de nuevas tecnologías para el sector de transporte, aplicadas a vehículos no motorizados, vehículos motorizados, remolques o semirremolques y su entorno, y para cuya ejecución requieren ser eximidos de una o más normativas emanadas del MTT, exceptuando el caso de vehículos autónomos.

Normativa que debiese liderar el Ministerio de Minería

- Modificación DS 132/02 MINMINERIA que reglamenta la seguridad minera para incorporar el uso de hidrógeno en minería, abordando la incertidumbre de los riesgos y falta de experiencia y entregar mayor claridad sobre requisitos para vehículos a hidrógeno en minería subterránea (primer trimestre 2024)

5.1 Necesidades del Proyecto para Obtención de Permisos

El Decreto 13 del Ministerio de Energía [74] establece los requerimientos generales de **diseño, construcción y operación** de instalaciones de hidrógeno gaseoso. Este decreto estipula que las instalaciones de hidrógeno nuevas, previo a su entrada en operación, deberán contar con un **Certificado de Conformidad de Instalación de Hidrógeno** para las etapas de diseño y construcción emitido por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.

Los hitos iniciales necesarios para dar curso a instalaciones de hidrógeno ante la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) son las siguientes:

- **Comunicación de Inicio de Obras a la SEC:** Previo al inicio de la construcción de toda Instalación de Hidrógeno o de cualquier modificación de ésta, el propietario deberá comunicar a la Superintendencia. Sin perjuicio de esto, toda instalación debe cumplir con sus respectivos permisos.
- **Inscripción de Instalación de Hidrógeno:** toda Instalación de Hidrógeno nueva, previo a su entrada en operación, y aquellas existentes que hayan experimentado alguna modificación, deberán ser inscritas ante la SEC. La inscripción no constituye aprobación del proyecto.

La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) deberá establecer el protocolo o norma de certificación y los Organismos de Certificación autorizados para la emisión del Certificado de Conformidad. Mientras dicho protocolo no exista, el artículo cuarto transitorio del Decreto 13 señala que se podrá verificar la conformidad del diseño y construcción de una instalación de hidrógeno, mediante un **documento emitido por un tercero independiente** con experiencia comprobable en trabajos realizados en instalaciones que almacenen y/o procesen gases inflamables a presión y/o líquidos criogénicos inflamables, dando cuenta que la instalación de hidrógeno cumple con las normas y especificaciones de diseño declaradas. A su vez, la circular 240271 del Ministerio de Energía publicada en septiembre 2024 precisa que se entenderá por tercero independiente con experiencia comprobable en trabajos realizados en instalaciones que almacenen y/o procesen gases inflamables a presión y/o líquidos criogénicos inflamables, a aquella persona natural o jurídica que acredite experiencia laboral en instalaciones de este tipo, y que no haya participado en el diseño ni en la construcción de la instalación de hidrógeno que se va a declarar, ni mantenga ningún vínculo de subordinación o dependencia con el propietario de la instalación

A su vez, las instalaciones de hidrógeno deberán cumplir con la normativa aplicable vigente, como la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y su ordenanza (OGUC), el Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo (D.S 594 de 1999, del Ministerio de Salud) y normas de diseño sísmico (NCh2369:2003, NCh2745:2013 o aquella que la reemplace). Asimismo, el Decreto 13 detalla requerimientos para los distintos componentes de la instalación de hidrógeno, ocupando como referente recurrente la NFPA2/2020 (normativa internacional “Hydrogen Technologies Code”).

Adicionalmente, la Resolución Exenta de la SEC 26807 estableció el procedimiento para la declaración de instalaciones de hidrógeno referidas en el D.S N° 13/2022 del Ministerio de Energía. El responsable de presentar la declaración corresponde al propietario de la instalación de hidrógeno, a través de un instalador de gas con Licencia Clase 5 autorizado por la SEC. El formato de presentación definido para el trámite de declaración de instalación de hidrógeno es virtual, a través de la Oficina de Partes del sitio web de la SEC.

Por otro lado, si se desea certificar una instalación de hidrógeno líquido o alguna de las instalaciones excluidas del Decreto 13 se debe realizar su solicitud de autorización mediante el uso de la “Guía de Apoyo para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno” [75] o la “Guía de implementación de pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería del Servicio Nacional de Geología y Minería”, dependiendo del caso. Para solicitar la autorización de un proyecto especial de hidrógeno ante la Superintendencia de Electricidad y Combustibles los antecedentes del proyecto podrán ser ingresados de manera presencial en cualquiera de las Oficinas de Partes ubicadas en las distintas regiones del país, o a través de la Oficina de Partes virtual en el sitio web.

Las siguientes figuras muestran tanto los antecedentes requeridos a presentar como el proceso de autorización descrito en la “Guía de Apoyo para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno” [75]

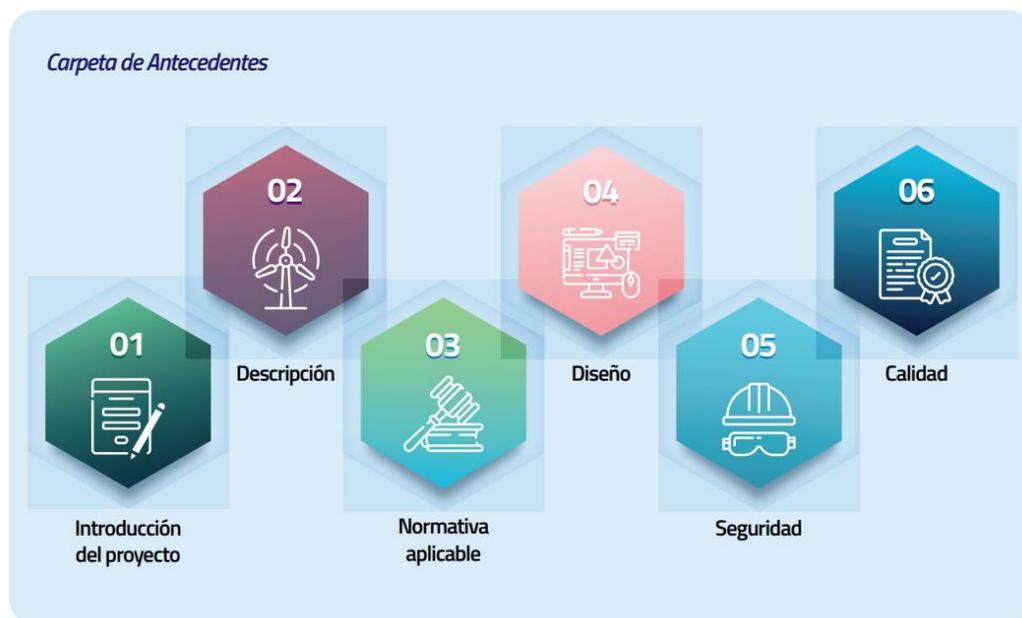


Figura 5-1: Antecedentes Principales a Presentar para Autorización Proyectos Especiales de Hidrógeno según SEC

Fuente: [75]

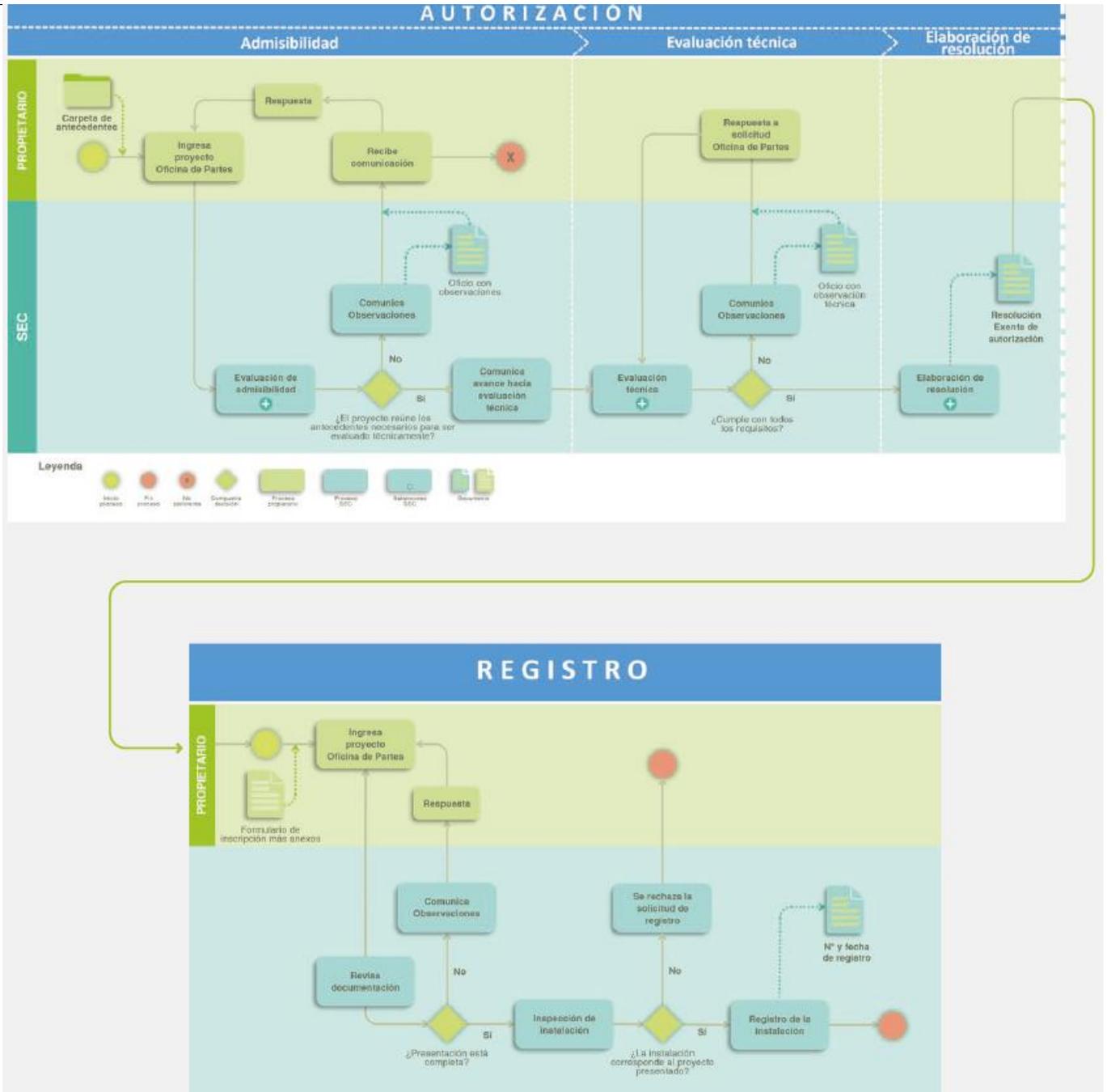


Figura 5-2: Diagrama de Proceso de Autorización y Registro de Proyectos Especiales de Hidrógeno según SEC

Fuente: [75]

Adicionalmente, debido a su naturaleza y de acuerdo a la Ley 19.300, los proyectos de Hidrógeno deben pasar por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). El Servicio de Evaluación Ambiental elaboró el documento “Criterio de Evaluación en el SEIA: Descripción integrada de proyectos para la generación de hidrógeno Verde en el SEIA” [76] donde se establece en qué condiciones un proyecto de H2V debe ser evaluado por el organismo. Para esto lo primero que se debe hacer es identificar a qué etapa de la cadena productiva pertenece el proyecto y en base a esto seguir los lineamientos de la Ley 19.300.

Para las diferentes etapas de la cadena productiva el Anexo 4.1 del documento señala la necesidad de ingreso al SEIA en las siguientes circunstancias.

- **Proyectos de energías renovables:**
 - Literal b), cuando se contemplen líneas de transmisión de alto voltaje y sus subestaciones.
 - Literal c), cuando se consideren centrales de generación de energía mayores a 3 MW.
 - Literal i), cuando se contemplen proyectos de desarrollo minero, por ejemplo, canteras.
 - Letra p), cuando se contemple ejecutar obras, programas o actividades en un área colocada bajo protección oficial.
 - Literal s), cuando se contemple ejecutar obras o actividades que alteren física o químicamente un humedal emplazado total o parcialmente dentro de los límites urbanos.

- **Proyectos para la producción de hidrógeno**
 - Literal a), en consideración al uso de agua en estos proyectos (suministro básico), en especial, respecto de obras vinculadas con el transporte o almacenamiento de agua (acueductos, embalses/presas).
 - Literal b.2.), cuando se contemplen subestaciones eléctricas. Se entenderá por subestaciones de líneas de transmisión de alto voltaje aquellas que se relacionan a una o más líneas de transporte de energía eléctrica y que tienen por objetivo mantener el voltaje a nivel de transporte.
 - Literal h), proyectos industriales o inmobiliarios que se ejecuten en zonas declaradas latentes o saturadas.
 - Literal j), cuando se contemplen oleoductos, gasoductos, ductos mineros u otros análogos. Se entenderá por ductos análogos aquellos conjuntos de canales o tuberías destinados al transporte de sustancias o residuos, que unen centros de producción, almacenamiento, tratamiento o disposición, con centros de similares características o con redes de distribución. Se exceptúan las redes de distribución y aquellos ductos destinados al transporte de sustancias o residuos al interior de los referidos centros de producción.
 - Literal k), cuando se contemplen instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales.
 - Literal ñ.1), producción, disposición o reutilización de sustancias tóxicas que se realice durante un semestre o más, en una cantidad igual o superior a diez mil kilogramos diarios (10.000 kg/día).
 - Literal ñ.3), producción, disposición o reutilización de sustancias inflamables (hidrógeno comprimido, clase 2, división 2.1 de la NCh382:2021; hidrógeno líquido refrigerado, clase 2, división 2.1, de la NCh382:2021 o metanol, clase 3 de la NCh382:2021), durante un semestre o más y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a los 80.000 kg/día. Si el proyecto considera una capacidad de almacenamiento de sustancias inflamables en una cantidad igual o superior a 80.000 kg.
 - Literal ñ.4), producción, disposición o reutilización de sustancias reactivas (oxígeno, clase 5 NCh382, en el caso de que el oxígeno sea un producto reutilizado) que se realice durante un

- semestre o más, y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a 120.000 kg/día.
- Literal o.6), emisarios submarinos, por ejemplo, asociado a la descarga de efluente de una planta desaladora que abastezca con agua al proyecto.
 - Literal o.7.4), traten efluentes con una carga contaminante media diaria igual o superior al equivalente a las aguas servidas de una población de cien (100) personas, en uno o más de los parámetros señalados en la respectiva norma de descargas de residuos líquidos.
 - Literal o.9), sistemas de tratamiento, disposición o eliminación de residuos peligrosos con una capacidad de veinticinco kilos día (25 kg/día) para aquellos que estén dentro de la categoría de “tóxicos agudos”, según DS 148/2003 del Ministerio de Salud; y de mil kilos día (1000 kg/día), para otros residuos peligrosos.
 - Letra p), cuando se contemple ejecutar obras, programas o actividades en un área colocada bajo protección oficial.
 - Literal s), cuando se contemple ejecutar obras o actividades que alteren física o químicamente un humedal emplazado total o parcialmente dentro de los límites urbanos.
- **Proyectos para el acondicionamiento y almacenamiento de hidrógeno**
- Literal h), proyectos industriales o inmobiliarios que se ejecuten en zonas declaradas latentes o saturadas.
 - Literal j), cuando se contemplen oleoductos, gasoductos, ductos mineros u otros análogos. Se entenderá por ductos análogos aquellos conjuntos de canales o tuberías destinados al transporte de sustancias o residuos, que unen centros de producción, almacenamiento, tratamiento o disposición, con centros de similares características o con redes de distribución. Se exceptúan las redes de distribución y aquellos ductos destinados al transporte de sustancias o residuos al interior de los referidos centros de producción.
 - Literal k), cuando se contemplen instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales.
 - Literal ñ.1), producción, disposición o reutilización de sustancias tóxicas que se realice durante un semestre o más, en una cantidad igual o superior a diez mil kilogramos diarios (10.000 kg/día).
 - Literal ñ.3), cuando se considere la producción, disposición o reutilización de sustancias inflamables (hidrógeno comprimido, clase 2, división 2.1 de la NCh382:2021; hidrógeno líquido refrigerado, clase 2, división 2.1, de la NCh382:2021 o metanol, clase 3 de la NCh382:2021), durante un semestre o más y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a los 80.000 kg/día. Si el proyecto considera una capacidad de almacenamiento de sustancias inflamables en una cantidad igual o superior 80.000 kg.
 - Literal ñ.4), cuando se considere la producción, disposición o reutilización de sustancias corrosivas (amoníaco, peligro secundario, clase 8 (sustancias corrosivas), de la NCh382:2021) o reactivas (oxígeno, clase 5, división 5.1, de la NCh382:2021) que se realice durante un semestre o más, y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a 120.000 kg/día. Si el proyecto considera una capacidad de almacenamiento de sustancias reactivas en una cantidad igual o superior a 120.000 kg.
 - Letra p), cuando se contemple ejecutar obras, programas o actividades en un área colocada bajo protección oficial.
 - Literal s), cuando se contemple ejecutar obras o actividades que alteren física o químicamente un humedal emplazado total o parcialmente dentro de los límites urbanos.
- **Proyectos para la reconversión de hidrógeno**



- Literal h), proyectos industriales o inmobiliarios que se ejecuten en zonas declaradas latentes o saturadas.
 - Literal k), cuando se contemplen instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales.
 - Literal c), cuando se consideren centrales de generación de energía mayores a 3 MW. Esto principalmente es para el abastecimiento de la energía eléctrica limpia y renovable para este tipo de proyectos como: fotovoltaica, eólica u otras.
 - Literal ñ.1), cuando se considere la producción, disposición o reutilización de sustancias tóxicas (metanol, peligro secundario, división 6.1 (sustancias tóxicas) de la NCh382:2021), que se realice en un semestre o más, en una cantidad igual o superior a 10.000 kg/día. Si el proyecto considera una capacidad de almacenamiento de sustancias tóxicas en una cantidad igual o superior a 30.000 kg.
 - Literal ñ.3), cuando se considere la producción, disposición o reutilización de sustancias inflamables (hidrógeno comprimido, clase 2, división 2.1 de la NCh382:2021; hidrógeno líquido refrigerado, clase 2, división 2.1, de la NCh382:2021 o metanol, clase 3 de la NCh382:2021), durante un semestre o más y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a los 80.000 kg/día. Si el proyecto considera una capacidad de almacenamiento de sustancias inflamables en una cantidad igual o superior 80.000 kg.
 - Literal ñ.4), cuando se considere la producción, disposición o reutilización de sustancias corrosivas (amoníaco, peligro secundario, clase 8 (sustancias corrosivas), de la NCh382:2021) o reactivas (oxígeno, clase 5, división 5.1, de la NCh382:2021) que se realice durante un semestre o más, y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a 120.000 kg/día. Si el proyecto considera una capacidad de almacenamiento de sustancias reactivas en una cantidad igual o superior a 120.000 kg.
 - Literal o.9), sistemas de tratamiento, disposición o eliminación de residuos peligrosos con una capacidad de veinticinco kilos día (25 kg/día) para aquellos que estén dentro de la categoría de “tóxicos agudos”, según DS 148/2003 del Ministerio de Salud; y de mil kilos día (1000 kg/día) para otros residuos peligrosos¹⁴.
 - Letra p), cuando se contemple ejecutar obras, programas o actividades en un área colocada bajo protección oficial.
 - Literal s), cuando se contemple ejecutar obras o actividades que alteren física o químicamente un humedal emplazado total o parcialmente dentro de los límites urbanos.
- **Proyectos asociados al transporte y distribución del H2V**
- Letra f), puertos, vías de navegación, astilleros y terminales marítimos.
 - Literal j), cuando se contemplen oleoductos, gasoductos, ductos mineros u otros análogos. Se entenderá por ductos análogos aquellos conjuntos de canales o tuberías destinados al transporte de sustancias o residuos, que unen centros de producción, almacenamiento, tratamiento o disposición, con centros de similares características o con redes de distribución. Se exceptúan las redes de distribución y aquellos ductos destinados al transporte de sustancias o residuos al interior de los referidos centros de producción.
 - Literal ñ.5), cuando se considere el transporte por medios terrestres de sustancias tóxicas, explosivas, inflamables, corrosivas o reactivas que se realice durante un semestre o más, en una cantidad igual o superior a cuatrocientas toneladas diarias (400 t/día).
 - Letra p), cuando se contemple ejecutar obras, programas o actividades en un área colocada bajo protección oficial.
 - Literal s), cuando se contemple ejecutar obras o actividades que alteren física o químicamente un humedal emplazado total o parcialmente dentro de los límites urbanos.

En cualquiera de los casos señalados el proyecto debe ingresar al SEIA y atravesar todas sus etapas hasta obtener su respectiva Resolución de Calificación Ambiental (RCA) para poder ser ejecutado. Para la obtención de la RCA puede ser necesario una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), dependiendo del caso.

5.2 Normativa Aplicada al Sistema de Carga

5.2.1 Antecedentes Generales

El Decreto 160 de 2008 de Minecon, actualizado por última vez el 2020, establece el Reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimientos de combustibles líquidos. Este reglamento establece los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir las instalaciones de combustibles **líquidos derivados del petróleo y biocombustibles** y las operaciones asociadas a la producción, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de éstos que se realicen en tales instalaciones, así como las obligaciones de las personas naturales y jurídicas que intervienen en dichas operaciones. Si bien este decreto **no considera el hidrógeno**, su artículo 4 señala que “en aquellas materias contempladas en el presente reglamento que no cuenten con disposiciones técnicas nacionales, se deberá aplicar normas, códigos, especificaciones extranjeras, así como prácticas recomendadas de ingeniería, internacionalmente reconocidas.

A su vez, y como se mencionó previamente, el Decreto 13 del Ministerio de Energía excluye las instalaciones de dispensado de hidrógeno, por lo que no se establecen criterios regulatorios al respecto.

Ante la falta de regulación actual en sistemas de carga a hidrógeno en el país y, tal como fue señalado previamente, el PDT de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030 [66] reconoce la necesidad de elaboración del **Reglamento para las estaciones de dispensado de hidrógeno**, donde se establezcan los requisitos técnicos de seguridad en el dispensado de hidrógeno gaseoso a vehículos tanto para vía pública como offroad. Estos aplican a la interfaz de conexión para dispensado y comunicación con el vehículo, sistema de comunicación, protocolo de llenado y medición de cantidad dispensada. Dicho documento señala la siguiente reglamentación internacional sugerida o referencial al respecto:

- EIGA 15/06, EIGA 06/19 GASEOUS HYDROGEN STATIONS.
- SAE J2601, SAE J2601/2, SAE J2601/3 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
- ANSI/CSA HGV 4.8 Hydrogen Gas Vehicle Fueling Station Compressor Guidelines.
- Directiva 2008/68/CE y 49 C.F.R. 171 a 180.
- ISO 14687 Hydrogen fuel quality — Product specification.
- ISO 19.880 Gaseous Hydrogen fueling stations
- EN 17124 Hydrogen fuel Product specification and quality assurance Proton exchange membrane (fuel cell applications for road vehicles
- Cap. 10 de la NFPA 2/2020.
- NCh-ISO16924.

Por otro lado, el mismo documento de plan de trabajo reconoce que ante una futura masificación de la producción de hidrógeno en diferentes puntos del país y un aumento del parque vehicular a hidrógeno, se debiesen regular las estaciones de servicio público en el territorio nacional para que éstas puedan comercializar hidrógeno cumpliendo la normativa de seguridad (**Elaboración Reglamento para las Estaciones Multicombustible de Dispensado Público**).

5.2.2 Solicitud de Proyecto Especial según SEC

Como se mencionó, los proyectos de dispensado de hidrógeno a vehículos no se encuentran regulados por el Decreto 13, por lo que, para su funcionamiento, se debe considerar su solicitud de autorización e inscripción como proyecto especial a la SEC.

De acuerdo a la “Guía de Apoyo para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno” [43], el proceso general consta de la etapa de Autorización y la etapa de Registro (Figura 5-2 considera diagrama detallado y Figura 5-3 diagrama resumido):

1. **Autorización:** este proceso consta de cuatro etapas: ingreso, admisibilidad, evaluación técnica y elaboración de resolución de autorización. Se inicia mediante la presentación de antecedentes del proyecto mediante la Oficina de Partes Virtual de la SEC. Posteriormente, se lleva a cabo una revisión documental y luego una revisión técnica para verificar que el proyecto cumple con los estándares normativos, de seguridad, diseño y conformidad. Una vez constatado esto, se autoriza el proyecto especial mediante resolución fundada.
2. **Registro:** es una presentación, denominada indistintamente como registro, inscripción o declaración, efectuada ante la Superintendencia, respecto de la ejecución conforme a las normas legales, reglamentarias y técnicas sobre la materia, de una instalación de hidrógeno nueva o de la modificación de una instalación de hidrógeno existente, previa a su entrada en operación.



Figura 5-3: Diagrama Resumido Proceso de Autorización y Registro de Proyectos Especiales de Hidrógeno según SEC

Fuente: Elaboración Propia

La normativa extranjera referencial aplicable (a falta de normas chilenas referidas al tema) de acuerdo a la Guía de Apoyo es la siguiente (listado completo en Anexos):

1. ISO 19880-1 Hidrógeno gaseoso — Requerimientos generales de estaciones de carga
2. NFPA 2 Cap 10 GH2 Estaciones de carga vehicular
3. ISO 17268 Dispositivos de conexión para el reabastecimiento de vehículos terrestres con hidrógeno gaseoso.
4. SAE J2601 Protocolos de abastecimiento para vehículos ligeros terrestres de hidrógeno gaseoso.
5. SAE J2601/2_2014 Protocolo de abastecimiento para vehículos pesados impulsados por hidrógeno gaseoso.
6. SAE J2601/3_2013 Protocolo de abastecimiento para camiones industriales impulsados por hidrógeno gaseoso.
7. ASME B31.12 Tuberías y conductos de hidrógeno.
8. EIGA 15/06 Estaciones de hidrógeno gaseoso.

A modo de ejemplo de implementación del procedimiento de solicitud de proyecto especial, las empresas COPEC y Linde instalaron la primera estación de carga de hidrógeno a un vehículo en la comuna de Pudahuel (capítulo 2.6.2.2.4). La SEC autorizó este proyecto mediante la resolución exenta N°16062 [77], y fue regulado a través de

una serie de normativas extranjeras como las mencionadas anteriormente, las que se debieron entregar, en conjunto con los antecedentes del proyecto, para su correcta revisión.

5.3 Normativa Aplicada a Camiones y Buses a Hidrógeno

Chile cuenta con un marco normativo bien establecido para la importación, homologación y operación de vehículos a combustión, como buses y camiones diésel, que incluye regulaciones técnicas, ambientales y tributarias. Estas normativas han sido clave para garantizar la seguridad y la compatibilidad de los vehículos con las condiciones locales. Sin embargo, cuando se trata de tecnologías emergentes, el panorama regulatorio se encuentra en etapas de desarrollo.

En el caso de los vehículos eléctricos, se han implementado normas específicas de homologación y beneficios tributarios, incluyendo la entrada en vigencia de la Ley de Eficiencia Energética en 2024. Esta ley establece un mecanismo de ponderación que permite valorar hasta tres veces los vehículos eléctricos en el cálculo del estándar exigido para importadores, incentivando aún más su incorporación en las flotas vehiculares. Estas medidas, junto con las exigencias en las licitaciones de transporte público, han facilitado la adopción masiva de buses eléctricos en Santiago, posicionando a la ciudad como líder en electromovilidad en la región.

Sin embargo, para los vehículos a hidrógeno, aún no existen regulaciones específicas de homologación, y las estrategias actuales del Ministerio de Energía y Transporte están en proceso de formulación, enfocándose en el desarrollo de una infraestructura adecuada y un marco regulatorio que permita la transición hacia esta tecnología. Se debe recordar, que tal como fue señalado previamente el Decreto 13 del Minecon excluye expresamente los vehículos que operen como hidrógeno y las instalaciones surtidoras para estos.

El primer lugar, se ha revisado qué entiende la normativa nacional por vehículos pesados. La siguiente clasificación emana de aquella usada para definir criterios de emisiones admisibles por tipo de vehículo:

- **Vehículos motorizados livianos:** vehículos con un peso bruto de menos de 2.700 kg., excluidos los de tres o menos ruedas. Estos se clasifican en vehículos de pasajeros y comerciales (Decreto N° 211, de 1991, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones).
- **Vehículos motorizados medianos:** vehículo motorizado destinado al transporte de personas o carga por calles y caminos que tiene un peso bruto vehicular igual o superior a 2.700 e inferior a 3.860 kilogramos (Decreto N° 54, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones)
- **Vehículo motorizado pesado:** vehículo motorizado destinado al transporte de personas o carga, por calles y caminos que tiene un peso bruto vehicular igual o superior a 3.860 kilogramos (Decreto N° 55, de 1994, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones)

Asimismo, esta clasificación no es del todo coherente con otros criterios existentes, como lo es lo requerido por las licencias de conducir y normado por la Ley de Tránsito (Ley N°18.290) y las categorías contempladas por las Plantas de Revisión Técnica según el Decreto 167 de 1985 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. Si bien estos otros dos criterios no realizan la clasificación entre livianos, medianos y pesados, es posible un orden y comparar estas 3 clasificaciones, tal como lo resume la siguiente tabla.

Tabla 5-1: Clasificación entre vehículos livianos, medianos y pesados según criterio

Criterio	Vehículo liviano	Vehículo mediano	Vehículo pesado
Licencias de Conducir (Ley N° 18.290)	Clase A1 (taxis) Clase B: Hasta 3.500 kg	Clase A2 (transportes pasajeros hasta 17 asientos) y Clase A4 (vehículos simples de carga mayor con PBV > 3.500 kg)	Clase A3 (transportes pasajeros sin limitación de asientos) y Clase A5 (simples o articulados de carga cuyo PBV > 3.500 kg)
PRT (Decreto 167/85, MTT)	Tipo B: Vehículos livianos y medianos de pasajeros hasta 9 asientos que no presten servicios de taxi o similar y vehículos de carga de menos de 1.750 kg de capacidad	Tipo A1 y A2: Transporte de pasajeros (incluidos Taxis) y vehículos de carga de más de 1750 kg de capacidad	
Emisiones	Hasta 2.700 kg o con 3 o menos ruedas (Decreto 211/91 MTT)	Entre 2.700 kg y 3.860 kg. (Decreto 54/94 MTT)	Más de 3.860 kg. (Decreto 55/94 MTT)

Fuente: Elaboración Propia

Aunque los tres sistemas de clasificación se enfocan en el peso bruto vehicular, cada uno lo define de manera diferente (por ejemplo, en las licencias de conducir, los vehículos de más de 3.500 kg se clasifican como pesados, mientras que en el sistema de emisiones se considera pesado a partir de los 3.860 kg). Esto muestra que, aunque la base es el peso, no se sigue una norma unificada.

Esta falta de coherencia podría dificultar la implementación de políticas públicas y regulaciones relacionadas con emisiones, seguridad vial, y control técnico de vehículos. Alineando mejor estas clasificaciones, sería posible simplificar y hacer más eficaces las políticas de transporte y control vehicular.

5.3.1 Proceso de Importación e Implementación de Vehículos Pesados

A continuación, se presenta una descripción detallada del proceso necesario para importar e incorporar un vehículo pesado en el sistema de transporte chileno. Este análisis abarca desde la revisión de las normativas que rigen las características técnicas y de seguridad de los vehículos, hasta los pasos finales para integrarlo al sistema operativo.

Primero, se exploran las regulaciones clave que deben cumplirse para garantizar que el bus o camión cumpla con los estándares nacionales e internacionales aplicables. Posteriormente, se abordará el proceso de compra e importación del vehículo, incluyendo los trámites aduaneros y tributarios necesarios.

Además, se describen los procedimientos para obtener la autorización para operar en el sistema de transporte público (en el caso de los buses), junto con las adaptaciones y certificaciones adicionales que pueden ser requeridas según el sistema y la región de destino. También se considera la obtención de permisos municipales y sectoriales indispensables para el funcionamiento del bus o camión.

Este marco general busca ofrecer un entendimiento integral del proceso y las etapas necesarias para cumplir con los requisitos técnicos, operativos y legales vigentes.

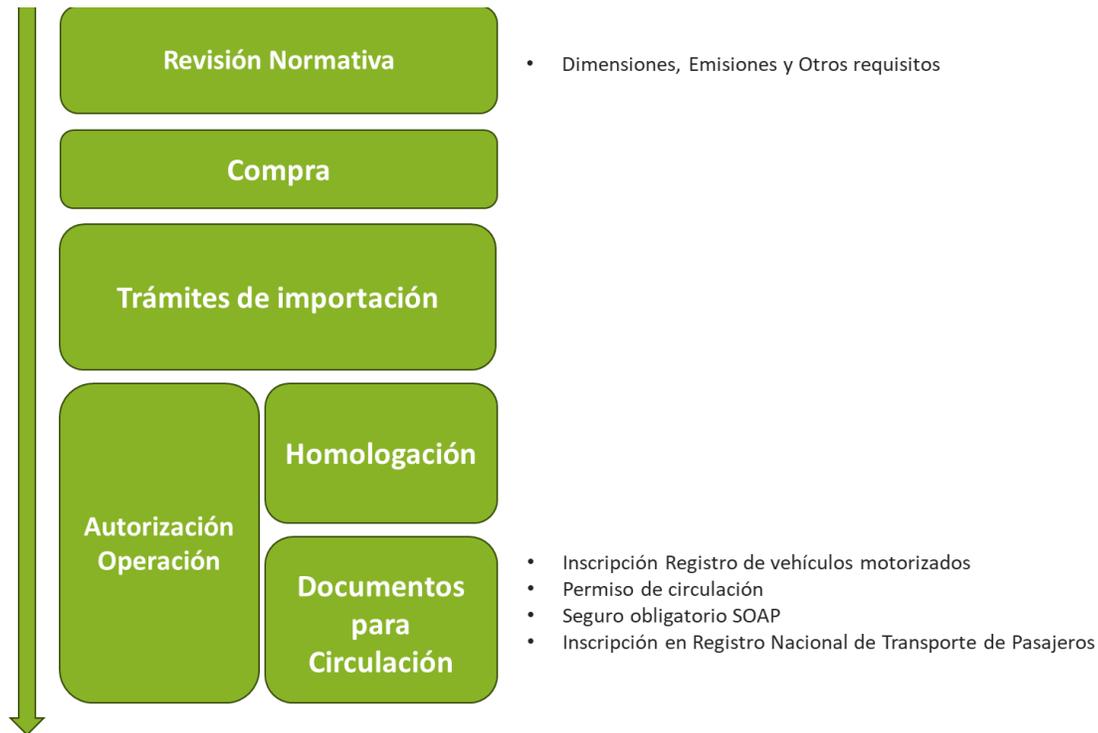


Figura 5-4: Proceso de Importación e Implementación Vehículos Pesados

Fuente: Elaboración Propia

5.3.1.1 Revisión de la Normativa

5.3.1.1.1 Dimensiones

El Decreto Supremo N°158 de 1980 del Ministerio de Obras Públicas y, sus modificaciones, fija los **límites de peso, por eje y total** con los cuales pueden circular vehículos de cualquier especie por caminos públicos, a excepción de aquellos vehículos de emergencia de la Dirección de Vialidad. Ante la necesidad de transportar alguna maquinaria u otro objeto que exceda los límites permitidos para el transporte vial, se debe solicitar autorización con antelación a la Dirección de Vialidad según lo describe el Manual de Autorizaciones para Transportes Especiales (MOP, 2023).

Tabla 5-2: Límite de Pesos Máximos por Eje para Vehículos en Caminos Públicos

Tipo de Eje	Tipo de Rodado	Límite de Peso (Ton.)
Simple	Simple	7
Simple	Doble	11
Doble	Simple	14
Doble	Doble + Simple	16
Doble	Doble	18
Triple	Simple	19
Triple	2 Doble + 1 Simple	23
Triple	Doble	25
Cuádruple	Doble	29
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (4 ruedas)	12
Simple (compuesto por semiejes)	Múltiple (8 ruedas)	14

Fuente: MOP 2023

Se consideran las siguientes aclaraciones:

- Se entiende por eje cuádruple a un conjunto de cuatro ejes cuya distancia entre centro de ruedas extremas es superior a 3,6 metros e inferior a 4,8 metros. Este tipo de eje solo puede ser utilizado con autorización de la Dirección de Vialidad para el transporte de carga indivisible.
- Se entiende que los ejes simples con rodado múltiple, de 4 u 8 ruedas, deben ir conectados a un sistema de suspensión neumático, hidráulico o hidroneumático, con la finalidad que el peso de la carga sobre la plataforma se distribuya uniformemente. Para el uso de sistemas compuestos por este tipo de ejes, a partir de conjuntos de cinco o más ejes, se exigirá direccionalidad de las ruedas por accionamiento mecánico o hidráulico.
- Se entiende por eje doble a un conjunto de dos ejes, cuya distancia entre centros de ruedas es superior a 1,20 metros e inferior a 2,40 metros.
- Se entiende por eje triple a un conjunto de tres ejes, cuya distancia entre centros de ruedas extremas es superior a 2,40 metros e inferior a 3,60 metros.
- No obstante, los límites señalados anteriormente para cada conjunto de ejes, cualquier subcombinación de ejes del conjunto deberá respetar los límites máximos asignados a ella en forma individual.

Con respecto al Peso Bruto Total, se tiene que

- Semiremolques: combinación de un camión con un semirremolque con eje posterior simple o doble.
 - Menor de 13 m. entre ejes extremos, máximo 39 ton.
 - De 13 a 15 m. entre ejes extremos, máximo 42 ton.
 - Más de 15 m. entre ejes extremos, máximo 45 ton.
 - Camión con semirremolque, con eje posterior triple, cualquiera sea la distancia entre ejes extremos, máximo 45 ton.



- Remolques: Camión con remolque, cualquier distancia entre ejes extremos, máximo 45 ton

Adicionalmente, la **Resolución 1, del año 1995 (actualizada al 2020)** del MTT establece que los vehículos que circulen por vías públicas no podrán exceder las siguientes dimensiones:

- **Ancho máximo** exterior, con o sin carga: 2,60 m (no se consideran espejos retrovisores ni sus soportes)
- **Alto máximo**, con o sin carga, sobre el nivel del suelo: 4,20 m, Para los camiones, remolques y semirremolques especiales para el transporte de automóviles, se acepta un alto máximo de 4,30 m.
- **Largo máximo**, considerado entre extremos anterior y posterior del vehículo:
 - Bus: 13,20 m. Excepcionalmente, tratándose de buses pullman a que se refiere la Resolución N° 98, de 1986, del MTT, cuyo largo exceda los 13,20 m sin superar los 14,00 m o los 15,00 m, tratándose de buses distintos a los buses de dos pisos podrán circular por las vías públicas, salvo por aquellas que estén expresamente prohibidas por la Dirección de Vialidad del MOP.
 - Bus articulado: 19,00 m
 - Camión: 11,00 m
 - Semirremolque, exceptuado para transporte de automóviles: 14,40 m
 - Remolque: 11,00 m
 - Tractocamión con semirremolque: 18,60 m
 - Camión con remolque o cualquier otra combinación: 20,50 m
 - Tractocamión con semirremolque y camión con remolque especiales para transporte de automóviles: 22,40 m

En el caso del largo del remolque no será considerada la barra de acoplamiento, la que sí se considera en el largo total de la combinación camión con remolque.

Las combinaciones tractocamión con semirremolque especial para el transporte de automóviles y tractocamión con semirremolque cuando se transporten exclusivamente vehículos, que excedan los 18,60 m de largo, sólo podrán circular en las vías que fije la Dirección de Vialidad;

No obstante, las combinaciones de vehículos formadas por más de dos unidades separables que excedan de 15,00 m largo requerirán de una autorización especial de Dirección de Vialidad, para circular por las vías públicas

Adicionalmente, la **Resolución N° 98, de 1986, del MTT** establece las condiciones que deben cumplir los buses que clasifican en la categoría Pullman. Estos requerimientos consideran aspectos: ventilación (no requerido en caso de taxibuses), calefacción, ventanas, asientos de pasajeros, portaequipajes, música ambiente y comunicaciones internas (no requerido en caso de taxibuses).

Por otro lado, el Decreto 122 de 1991 y sus modificaciones del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones **establece las dimensiones, características técnicas y de seguridad obligatorias para los vehículos destinados al transporte público** en Chile. Este marco regula aspectos clave, como las dimensiones máximas permitidas, la capacidad de pasajeros, los estándares de frenado y la iluminación, además de especificar requisitos técnicos relacionados con la seguridad de los usuarios. Este decreto constituye la base normativa para la homologación de buses en el país y asegura que todos los vehículos cumplan con los criterios mínimos necesarios para operar de manera eficiente y segura dentro de los sistemas de transporte público.

Según el artículo 2 bis de dicho decreto, los buses para los cuales se solicite su primera inscripción en el Registro Nacional de Transporte Público de Pasajeros, en las fechas y en las ciudades que por Resolución disponga el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, atendiendo a su longitud se clasificarán de la siguiente manera:

TIPOLOGÍA DE BUSES SEGÚN LONGITUD Y CARACTERÍSTICAS DE SU CARROCERÍA	Clases de buses, según DS 122/1991	Subclases de buses	Longitud en Metros (m)
	CLASE A ≥ 8 m y < 11 m	A1	< 9 m
		A2	≥ 9 m y < 11 m
	CLASE B ≥ 11 m y < 14 m	B1	≥ 11 m y < 12 m
		B2	≥ 12 m y < 14 m
		B2P	≥ 12 m y < 14 m, con puertas de servicio a ambos lados de su carrocería.
	CLASE C ≥ 14 m y < 18 m	C1	≥ 14 m y < 16,5 m
		C2	> 16,5 m y < 18 m
		C2P	> 16,5 m y < 18 m, con puertas de servicio a ambos lados de su carrocería.
	CLASE D ≥ 11 m y < 13 m de doble piso	D	≥ 11 m y < 13 m de doble piso

Figura 5-5: Tipología de Buses de Transporte Público Decreto 122/91 MTT

Fuente: (DTPM, 2017)

- Todas estas categorías podrán tener como máximo un ancho de 2.6 m
- Los buses Clase A deberán tener, a lo menos, dos puertas de servicio. En el caso de los buses Clase A2, a lo menos una de las puertas deberá ser doble y de entrada baja, pudiendo ubicarse en la parte delantera o central del bus
- Los buses Clase B y Clase D deberán tener un mínimo de dos puertas dobles de servicio y contar con entrada baja en ambas puertas.
- Los buses Clase C deberán tener un mínimo de tres puertas dobles de servicio, con dos de entrada baja, siendo la delantera una de ellas
- Los buses de las clases A2, B, C y D deberán tener, en al menos una de sus puertas de servicio de entrada baja, una plataforma que permita el acceso de usuarios con movilidad reducida
- El motor podrá estar ubicado en cualquier parte del vehículo, salvo en los buses de las Clases A2, B y C, que deberán tener el motor situado en la parte trasera o entre ejes del vehículo.

En el caso de los buses destinados a servicios interurbanos, el artículo 56° del Decreto 212 del MTT establece que deben ser del tipo pullman y tener una longitud igual o superior a 11 metros. Además, estos vehículos no podrán sufrir modificaciones ni adaptaciones en su estructura, debiendo tratarse exclusivamente de modelos estándar de fabricación.

En el caso del sistema RED de Santiago, se aplican estándares más altos que incluyen exigencias adicionales en términos de confort, accesibilidad universal, niveles de ruido y emisiones. El “Manual De Especificaciones Tecnológicas De Los Buses Para El Sistema De Transporte Público Metropolitano” (DTPM, 2024), aprobado mediante Resolución Exenta N°4772 del 2023 de DTPM y modificado posteriormente por Resolución Exenta N°1012 del 2024, define las adecuaciones interiores necesarias para permitir la instalación del equipamiento de los Proveedores de Servicios Tecnológicos Complementarios y la interacción con elementos instalados por el proveedor del Bus. La siguiente figura muestra los principales elementos y sistemas tecnológicos que se incorporaron en la licitación del sistema RED realizada el año 2023

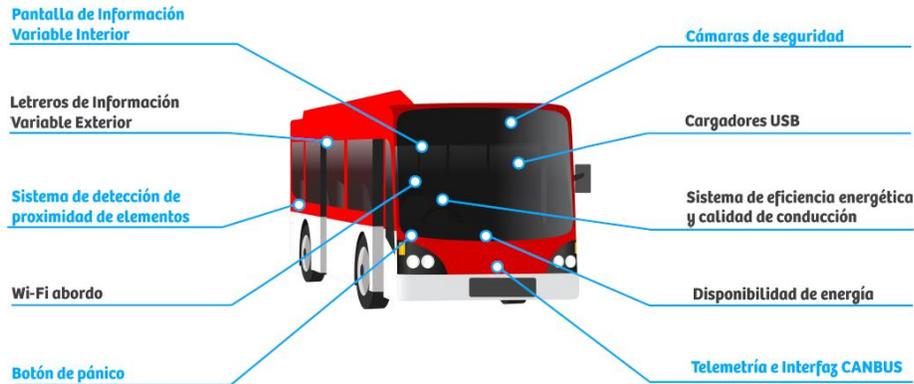


Figura 5-6: Principales elementos y sistemas tecnológicos buses estándar RED

Fuente: Lanzamiento Licitación Pública Concesión de Uso de Vías 2023 (DTPM, 2024)

Fuera de Santiago, el transporte público urbano está gestionado por las Seremis de Transporte de cada región. Si bien existen lineamientos generales emitidos por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), las regiones cuentan con la autonomía para adaptar ciertas regulaciones de acuerdo con sus características demográficas, geográficas y necesidades locales. Por ejemplo, ciudades como Valparaíso o Concepción disponen de sistemas de transporte integrados con normativas específicas para buses, trolebuses o trenes ligeros. Esto significa que cualquier bus destinado a incorporarse a un sistema de transporte regional debe cumplir con las especificaciones técnicas y normativas particulares definidas por la autoridad de transporte local correspondiente, las cuales se encuentran disponibles en la página de la Dirección de Transporte Público Regional (DTPR) de cada ciudad.

Un ejemplo de esto es la regulación para la implementación del sistema de recaudo electrónico en el transporte público, que implica la adaptación de los buses y las infraestructuras relacionadas a esta tecnología. Es importante tener en cuenta que las normativas pueden variar dependiendo de la región y de las necesidades o políticas implementadas en la misma. En algunos casos, la adopción de nuevas tecnologías como el recaudo electrónico lleva a establecer requisitos técnicos específicos que no son aplicables en regiones donde aún no se ha implementado este sistema.

5.3.1.1.2 Emisiones

Con respecto a la **normativa de emisiones**, el D.S. 55 / 1994 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (Establece Normas de Emisión Aplicables a Vehículos Motorizados) norma los vehículos pesados que ingresan al país. Este decreto considera camiones, tracto camiones y otros vehículos pesados; entre los que se encuentran buses locomoción colectiva urbana y rural, buses transporte privado, buses transporte público interurbano y todo vehículo cuyo peso bruto vehicular sea superior a 3.860 kg. Esta normativa fue actualizada por última vez en 2012, sin embargo, aunque fue aprobado antes de la normativa Euro VI, establece las bases para el cumplimiento de normativas internacionales de emisiones, y establece la posibilidad de adoptar normativas como las de la Unión Europea a medida que las tecnologías y estándares mejoran.

En cuanto a la certificación de emisiones para camiones y tracto camiones, los fabricantes, armadores, importadores o sus representantes deben seguir el procedimiento establecido por la **Resolución Exenta**

2113/2004 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, que fija las pautas generales para acreditar el cumplimiento del **D.S N° 55 de 1994**. Esta resolución establece los requisitos específicos para garantizar que estos vehículos cumplan con los estándares de emisiones estipulados, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales y asegurando que el sector del transporte pesado se alinee con las normativas vigentes en materia de calidad del aire.

Los estándares de emisiones exigidos en el D.S. N° 55 de 1994, considerando su última actualización (realizada en 2012), varían según el tipo de motor, el peso bruto del vehículo y las condiciones específicas en las que se realicen las mediciones. A continuación, se presentan las condiciones generales y los principales límites para los contaminantes regulados, exceptuando casos específicos. Para detalles sobre excepciones y condiciones particulares, se recomienda revisar directamente el decreto correspondiente.

Tabla 5-3: Límites de emisiones para Motores Diesel, D.S N°55 – Veh. Pesados

TABLA 4

	Fecha de entrada en vigencia	Condición normalizada de medición	Ciclo	CO (gr/kw-h)	HC (gr/kw-h)	HCNM (gr/kw-h)	NOx (gr/kw-h)	MP (gr/kw-h)
Vehículo motorizado pesado con excepción de buses	7 días después de la publicación del D.S. N°4 de 2012, del Ministerio de Medio Ambiente	(1)	ESC	1.5	0.46	-	3.5	0.02
			ETC	4.0	-	0.55	3.5	0.03
	1 de octubre 2014 (nuevos modelos)*	(2)	ESC	1.5	0.46	-	2.0	0.02
			ETC	4.0	-	0.55	2.0	0.03
	1 de octubre 2015 (todos los modelos)**	(2)	ESC	1.5	0.46	-	2.0	0.02
			ETC	4.0	-	0.55	2.0	0.03
buses	1 de septiembre 2013	(1)	ESC	1.5	0.46	-	3.5	0.02
			ETC	4.0	-	0.55	3.5	0.03
	1 de septiembre 2015	(2)	ESC	1.5	0.46	-	2.0	0.02
			ETC	4.0	-	0.55	2.0	0.03

Fuente: D.S N° 55 (MTT, Actualización 2012)

Para los motores a gasolina, el Decreto Supremo N° 55 no fue actualizado en 2012 en lo que respecta a los límites de emisiones, manteniéndose las exigencias previas. Estas especifican que las emisiones provenientes del sistema de escape deben cumplir con los siguientes límites, expresados en gramos por caballo de fuerza al freno por hora (g/bHP-h): monóxido de carbono (CO) 37,1 g/bHP-h, hidrocarburos totales (HC) 1,9 g/bHP-h y óxidos de nitrógeno (NOx) 5,0 g/bHP-h. Estos valores corresponden a las exigencias históricas para este tipo de motores, sin modificaciones posteriores en el marco del mencionado decreto.

Cabe mencionar que este decreto estará vigente hasta el 5 de enero de 2026 (según se indica en el mismo documento); sin embargo, se superpone con la exigencia de cumplir con los estándares de la Norma Euro VI,

requisito aplicable desde 2024 [78]. A continuación, se presentan los límites de emisiones establecidos por dicha normativa.

Tabla 5-4: Límites de emisiones según norma Euro VI

Límites de emisiones Euro VI

	Valores límite							
	CO (mg/kWh)	HCT (mg/kWh)	HCNM (mg/kWh)	CH ₄ (mg/kWh)	NO _x ⁽¹⁾ (mg/kWh)	NH ₃ (ppm)	Partículas (masa) (mg/kWh)	Partículas (número) (#/kWh)
WHSC (CI)	1 500	130			400	10	10	8,0 × 10 ¹¹
WHTC (CI)	4 000	160			460	10	10	6,0 × 10 ¹¹
WHTC (PI)	4 000		160	500	460	10	10	⁽²⁾ 6,0 × 10 ¹¹

Notas:

PI = Encendido por chispa

CI = Encendido por compresión

⁽¹⁾ El nivel admisible del componente NO₂ en el valor límite de los NO_x podrá definirse posteriormente.

⁽²⁾ El valor límite se aplicará a partir de las fechas establecidas en el anexo I, apéndice 9, cuadro 1, fila B, del Reglamento (CE) n° 582/2011.

Fuente: Norma EURO VI (Comisión Europea, 2009)

Para el caso específico de los buses, se presenta también el **Decreto Supremo N° 130 de 2001 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT)**, que establece los límites máximos de emisiones contaminantes para vehículos motorizados de transporte público urbano.

A continuación, se realiza una comparativa entre los límites establecidos por el decreto D.S N° 55, el D.S N° 130 para los buses del sistema de transporte público, y los definidos por la norma Euro VI, evidenciando que esta última establece requisitos significativamente más estrictos. Cabe mencionar que esta tabla tiene fines referenciales y es importante considerar que los valores específicos pueden variar dependiendo del tipo de vehículo, las condiciones particulares de las pruebas realizadas y las localidades del país en las que rigen.

Tabla 5-5: Comparativa de Límites de Emisiones: Decreto N° 55, Decreto N° 130 y Norma EURO VI

Contaminante	Motores Diesel			Motores Gasolina		
	D.S N°55	D.S N° 130	Norma EURO VI	D.S N°55	D.S N° 130	Norma EURO VI
CO (Monóxido de Carbono)	4.0 g/kW-h	2.1 g/kW-h	1.5 g/kW-h	27.7 g/kW-h	49.7 g/kW-h	1.0 g/kW-h
HC (Hidrocarburos No Metánicos)	0.55 g/kW-h	No especifica	0.13 g/kW-h	1.4 g/kW-h	1.419g/kW-h	No aplica
HCT (Hidrocarburos Totales)	0.46 g/kW-h	0.66 g/kW-h	No especifica	4.0 g/kW-h	2.55 g/kW-h	0.1 g/kW-h
NOx (Óxidos de Nitrógeno)	2.0 g/kW-h	5.0 g/kW-h	0.4 g/kW-h	3.7 g/kW-h	6.71 g/kW-h	0.06 g/kW-h



PM (Material Particulado)	0.03	0.10 – 0.13 g/kW-h	0.01 g/kW-h	No especifica	No especifica	0.0045 g/ kW-h
---------------------------	------	--------------------	-------------	---------------	---------------	----------------

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, para el caso de los buses urbanos, se tiene que el **Decreto Supremo N° 129, del 3 de diciembre de 2002 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones** establece la norma de emisión de ruidos para buses de locomoción colectiva urbana y rural. Este decreto tiene como objetivo regular los niveles máximos de ruido generados por los buses, contribuyendo a la mejora de la calidad ambiental y al bienestar de las comunidades urbanas y rurales.

Los niveles máximos de emisión de ruido permitidos para los buses de locomoción colectiva urbana o rural, según este Decreto, son los siguientes:

Tabla 5-6: Límites de Emisión de Ruido para Buses de locomoción colectiva, Según Decreto 129

Emisión (dB(A))	Buses Livianos	Buses Medianos y Pesados
Estacionario Escape	95	95
Motor	98	98
Interior	88	88
Dinámico Interior y Exterior	82	84

Fuente: Decreto Supremo N° 129 (MTT 2002),

5.3.1.1.3 Otros requisitos

Además de los requisitos de dimensiones y emisiones presentados anteriormente, existen otras normativas que regulan los buses del sistema de locomoción colectiva.

El **Decreto Supremo N° 169 de 2004 del MTT** establece la relación entre la potencia y el peso bruto técnico de los vehículos, Para los buses cuya longitud sea igual o superior a 15 metros, esta relación debe ser igual o superior a 7,5 kW/Ton, mientras que, para los buses con una longitud inferior a 15 metros, la relación debe ser de al menos 9,0 kW/Ton. Esto con la finalidad de asegurar que los buses sean adecuados para el transporte público según sus características mecánicas.

Por otro lado, el **Decreto Supremo N° 22 de 2006 del MTT** define los requisitos que deben cumplir los sistemas de frenos, luces, señalizadores y aparatos sonoros, garantizando la seguridad y visibilidad de los vehículos en circulación. Algunos de estos requisitos son los siguientes:

- **Sistemas de Frenos:** Los vehículos motorizados deben contar con al menos dos sistemas de frenos independientes, uno de los cuales debe accionar sobre todas las ruedas, salvo excepciones que determine el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones
- **Vidrios de Seguridad:** Los vidrios de los vehículos deben cumplir con normas de seguridad establecidas en la Resolución N° 48 de 2000. Esto es obligatorio para vehículos fabricados a partir de 2007. Los vehículos pueden utilizar vidrios oscurecidos, siempre que no sean el parabrisas ni los vidrios de las puertas delanteras.



- Láminas de Seguridad: Se permite la instalación de láminas en los vidrios, siempre que no se trate del parabrisas y que estas láminas tengan un propósito de seguridad, como reducir la fragmentación de los vidrios en caso de impacto.
- Dispositivos de Emergencia: Los vehículos deben estar equipados con dispositivos de emergencia que cumplan con las normativas vigentes.
- Uso de Teléfonos Celulares: Se prohíbe el uso de teléfonos celulares que requieran que el conductor los sostenga o manipule mientras conduce. Se especifican las condiciones bajo las cuales se considera que un sistema es de "manos libres".

Finalmente, la **Resolución N° 121 de 1987** establece las características del tubo de escape para vehículos a Diesel de locomoción colectiva en Santiago, regulando sus dimensiones y condiciones para minimizar las emisiones contaminantes y cumplir con las normativas ambientales aplicables. Los principales requisitos son los siguientes:

- Diseño del tubo de escape: Debe ser en forma vertical, de modo que la descarga de gases se efectúe por sobre el nivel del techo del habitáculo de pasajeros del vehículo.
- Protección del tubo: El tramo de tubo vertical deberá contar con una adecuada protección o pantalla, y su terminal debe estar diseñado para permitir de manera fácil la medición de la opacidad de los gases.
- Diámetro del tubo de escape: Para vehículos con motor de hasta 100 CV-DIN, el diámetro del tubo de escape será de 3 pulgadas. Y para aquellos con motor de potencia superior, el diámetro será de 3 1/2 pulgadas.

Estas especificaciones son parte de las regulaciones establecidas para asegurar el cumplimiento de los estándares de emisión (presentados anteriormente) y la seguridad en el transporte público.

5.3.1.2 Compra e Importación del Vehículo

La compra e importación de un vehículo implica una serie de pasos técnicos, administrativos y financieros que aseguran su compatibilidad con las normativas nacionales. A continuación, se detallan las etapas principales de este proceso.

5.3.1.2.1 Selección del Vehículo

La selección del vehículo debe considerar que se cumplan con las regulaciones chilenas señaladas previamente en la revisión de la normativa.

Es fundamental tener en cuenta que, según la legislación chilena, específicamente el **artículo 21 de la Ley N° 21.483, está prohibida la importación de vehículos usados**, excepto en ciertos casos excepcionales. Estas excepciones incluyen vehículos de emergencia, como ambulancias y vehículos destinados a la protección civil (por ejemplo, camiones de bomberos), así como aquellos que ingresan a zonas francas, como las ubicadas en Iquique y Punta Arenas, donde se permiten condiciones especiales para la importación de vehículos usados debido a las características y necesidades particulares de estas regiones. Esta normativa tiene como objetivo promover la importación de vehículos nuevos con estándares más altos de eficiencia y menos emisiones contaminantes, y así reducir el impacto ambiental del parque automotriz chileno.

5.3.1.2.2 Trámites de Importación

Para la importación del vehículo se deben realizar los trámites aduaneros ante el Servicio Nacional de Aduanas.



Para realizar una importación comercial en Chile, es obligatorio que el importador contrate a un agente de aduanas. Este profesional se encarga de gestionar el desaduanamiento de las mercancías y de presentar la Declaración de Ingreso al Servicio Nacional de Aduanas, proceso que se realiza electrónicamente. Para confeccionar la Declaración de Ingreso, el importador debe entregar ciertos documentos de base necesarios. Cabe destacar que, con el objetivo de facilitar el proceso, la Directora Nacional podrá habilitar, hasta por un plazo máximo de 90 días, determinados locales o recintos particulares para el depósito de mercancías, sin previo pago de los derechos e impuestos que correspondan, ya sea de oficio o a petición de los interesados.

Los documentos obligatorios para toda importación comercial incluyen:

- **Conocimiento de embarque original, carta de porte o guía aérea**, que acredita la propiedad de la mercancía por parte del consignatario.
- **Factura comercial original**, que detalla las mercancías objeto de compraventa y sus valores.
- **Declaración jurada del importador**, en la que se informa el precio de las mercancías, un formulario proporcionado por el agente de aduanas.
- **Mandato** constituido por el endoso del original del conocimiento de embarque.
- **Certificado de Homologación**, gestionada por el Ministerio de Transportes.

Adicionalmente, hay documentos que se exigen solo en casos específicos, como:

- **Certificado de origen**, si se busca acogerse a preferencias arancelarias de algún acuerdo comercial.
- **Lista de empaque**, especialmente para mercancías acondicionadas en contenedores.
- **Certificado de seguro**, si el valor de la prima no está incluido en la factura comercial.

En términos de costos, las importaciones en Chile están sujetas al pago de tributos, que incluyen un derecho ad valorem del 6% sobre el valor CIF (costo del bien, más el seguro y el flete) y el IVA del 19%, calculado sobre el valor CIF más el derecho ad valorem. Por ejemplo, para un valor CIF de US\$1.000, el derecho ad valorem sería US\$60, y el IVA, US\$201,40, sumando un total de tributos aduaneros de US\$261,40 (26,14%). Cabe destacar que, si la importación corresponde a mercancías del Estado, no se presentarán costos de importación, siempre y cuando se acredite adecuadamente que se trata de bienes públicos ante las instituciones correspondientes. Esta acreditación es esencial para eximir a la importación de los tributos usualmente aplicados a bienes privados.

Adicionalmente, deben considerarse otros costos relacionados con el proceso logístico, como los costos de almacenamiento en puerto o transporte interno. El costo de almacenamiento dependerá del tiempo que el vehículo permanezca en el puerto, mientras que el costo de transporte interno variará según la distancia entre el puerto y el destino final de la mercancía. Estos costos adicionales son variables y deben ser contemplados al calcular el gasto total de la importación.

Cabe destacar que Chile mantiene acuerdos comerciales con países como Estados Unidos, Europa y China. Estos tratados permiten a los importadores acogerse a beneficios y reducciones arancelarias, siempre que cumplan con los requisitos establecidos, como la presentación del certificado de origen correspondiente.

El tiempo estimado para completar los trámites de importación puede ser tan corto como un día a una semana, siempre y cuando los documentos sean entregados correctamente. La principal restricción en cuanto a tiempos

depende de la exactitud y completitud de la documentación presentada por el agente de aduanas, quien juega un papel crucial en la agilidad del proceso.

Una vez finalizado el proceso de desaduanamiento, se emite **la Declaración de Ingreso (DIN), un documento que certifica que las mercancías han sido legalmente ingresadas a Chile y que se han cumplido todos los trámites aduaneros**, incluyendo el pago de impuestos y derechos correspondientes. La DIN tiene vigencia indefinida y permite al importador disponer legalmente de las mercancías, ya sea para su uso, comercialización o distribución dentro del país. Además, este documento actúa como respaldo para acreditar la propiedad de los bienes y para realizar trámites posteriores, como la homologación de vehículos o la certificación de productos. También autoriza el transporte de las mercancías en territorio nacional, asegurando que se opera dentro del marco legal establecido.

5.3.1.3 Autorización para Operar en el País

5.3.1.3.1 Homologación Vehicular

El Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV) del MTT es el encargado de llevar a cabo el proceso de homologación vehicular en el país. Ningún vehículo puede circular en Chile si no cuenta con la homologación que sólo entrega el 3CV, salvo que correspondan a proyectos piloto o experimentales (Decreto 67 de 2021 del MTT) que permite la circulación por períodos restringidos de tiempo.

Este proceso consiste en un análisis que permite verificar que se cumplan todas las exigencias normativas vigente (emisiones, dimensionales, funcionales), con especial énfasis en las medidas de seguridad.

En el caso de los vehículos a combustión se debe asegurar el cumplimiento de la normativa de emisiones correspondiente. Para los vehículos eléctricos se revisan los requisitos asociados al sistema eléctrico y compatibilidad con sistemas de energía de Chile, requisitos establecidos por la SEC. Adicionalmente, dependiendo del uso del vehículo, podrían aplicarse otros requisitos específicos. Por ejemplo, en el caso de los buses de transporte público en Santiago.

Los documentos necesarios para la homologación incluyen:

- Ficha técnica del vehículo.
- Certificado de emisiones.
- Declaración de características técnicas.
- Certificado de homologación en el país de origen (si corresponde).

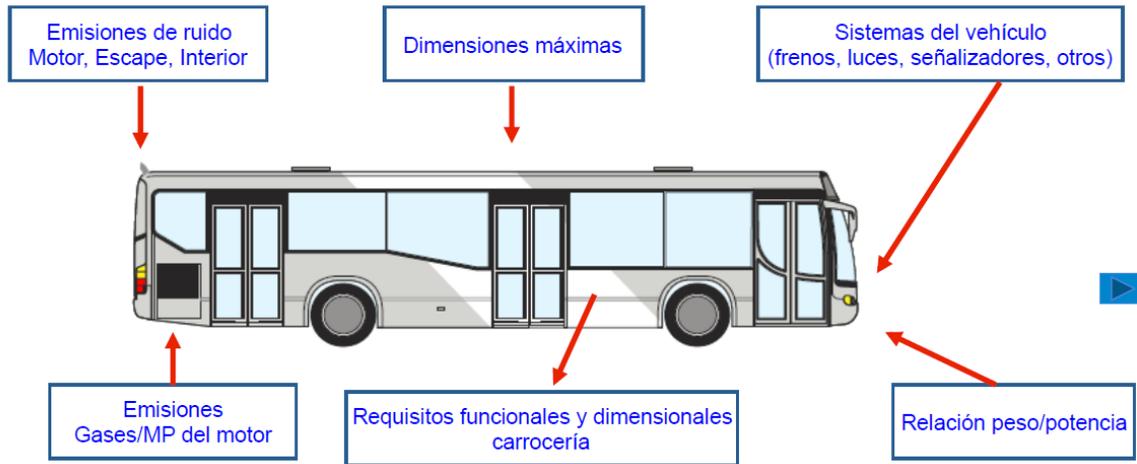


Figura 5-7: Principales ámbitos que contempla la certificación de un bus urbano Sistema RED

Fuente: (DTPM, 2017)

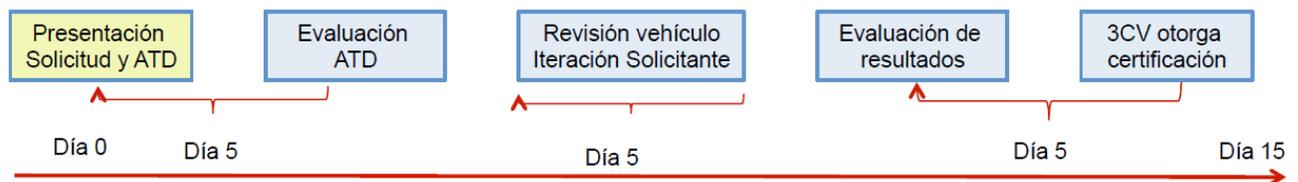


Figura 5-8: Etapas del proceso de certificación

Fuente: (DTPM, 2017)

El proceso de homologación puede tardar, dependiendo de la complejidad del vehículo y la carga de trabajo del 3CV. Según la figura anterior publicada por DTPM el año 2017, el proceso tiene una duración de 2 semanas. Por otro lado, según lo señalado por la Empresa Reborn Electric Motors, actualmente el proceso de homologación de un bus eléctrico dura unas 3 semanas y ellos estiman que el de su bus a hidrógeno (que esperan realizar a comienzos de 2025) dure unos 2 a 3 meses. Al consultar al respecto al 3CV, se señaló que el proceso de solicitud suele durar unas dos semanas si es que se presenta la documentación completa, pero se extiende cuando no se presentan todos los antecedentes correspondientes. Posteriormente, este proceso considera una inspección del vehículo que no suele tomar más de 4 días. Según el 3 CV todo este proceso podría tomar unas 4 semanas en total.

Si bien actualmente no existe normativa específica con respecto a la homologación de vehículos a hidrógeno, esto no es impedimento para que se puedan homologar. Aquellos requisitos de dimensiones y temas eléctricos siguen aplicando en el caso de vehículos con celdas de combustible y, para aquellos relacionados con los componentes a hidrógeno, se exige la presentación del certificado de homologación del país de origen. De esta forma, ya se encuentra homologado en Chile el modelo de vehículos liviano a hidrógeno Toyota Mirai.

Las tarifas del servicio de homologación vehicular son fijadas por decreto de Ministerio de Hacienda y Transporte y dependen según el tipo de vehículo. El valor actual de la homologación de un bus eléctrico es de 2.7 millones de pesos aproximadamente, valor que debiese ser similar a un bus a hidrógeno dado que los componentes de celdas de combustible no se homologarían aún con pruebas de laboratorio sino mediante certificación de homologación en país de origen.

Si este proceso es exitoso se obtiene un certificado de homologación. El certificado de homologación no tiene una duración fija en el sentido de que una vez otorgado, el vehículo queda homologado para su circulación en el país. Sin embargo, la vigencia del certificado puede estar sujeta a ciertos cambios normativos, es decir, si hay nuevas actualizaciones en las regulaciones de emisiones, seguridad o tecnologías aplicables a los vehículos, los vehículos homologados podrían necesitar actualizar o renovar su homologación para ajustarse a esos nuevos estándares.

Adicionalmente, el vehículo debe seguir cumpliendo con los requisitos de emisiones y someterse a la revisión técnica periódica (como se estipula en la Ley N° 18.290 sobre Tránsito) para verificar que continúe siendo apto para circular sin exceder los límites de contaminantes establecidos.

5.3.1.3.2 Ingreso al Registro de Vehículos Motorizados (RVM)

Para que un vehículo pueda circular por las calles y caminos públicos de Chile, debe ser inscrito en el Registro de Vehículos Motorizados del Registro Civil, conforme a lo establecido por la Ley N° 18.290 de 1984 (Ley de Tránsito) y el D.S. N° 22/2020 (Reglamento del Registro de Vehículos Motorizados).

Para llevar a cabo este proceso de inscripción, se deben presentar los siguientes documentos, dependiendo de la situación del vehículo:

- **Factura de Primera Venta (vehículos nuevos):** Se debe presentar la factura original, manual o electrónica, extendida por el importador, fabricante autorizado o uno de sus distribuidores o concesionarios, o bien, la fotocopia del original cliente de la factura, legalizada ante notario.
- **En el caso de vehículos aduaneros:** Documento aduanero original o copia uso exclusivo del RVM, extendida por la Dirección Nacional de Aduanas, en que conste la internación legal del vehículo y el pago de los derechos aduaneros o la franquicia a que se acoge.
- **Resolución judicial** (cuando corresponda): Si el vehículo ha sido objeto de una resolución judicial, debe presentarse la sentencia firme y ejecutoriada que ordene expresamente la inscripción del vehículo.

La inscripción puede tardar hasta 30 días hábiles y el costo de realizar el trámite, tanto para vehículos livianos, medianos o pesados corresponde a un total de \$82.230 CLP, valor en el que se incluye la inscripción (\$51.500) y la placa patente (\$30.730).

La inscripción contiene:

- Individualización del propietario.
- Características del vehículo.
- La Placa Patente Única (PPU) asignada.
- Otras anotaciones que puedan afectar las características del vehículo o su situación jurídica



5.3.1.3.3 *Revisión Técnica y Permiso de circulación*

Para que el vehículo pueda operar legalmente en Chile, es obligatorio pasar por una **Revisión Técnica** en una planta autorizada. Este procedimiento verifica que el vehículo cumpla con los estándares de seguridad y emisiones establecidos por las autoridades competentes. El D.S 156/1990 del MTT es el que reglamenta las revisiones técnicas y la autorización y funcionamiento de las plantas revisoras. Según señala dicho decreto la primera revisión técnica que se efectúe a un vehículo amparado por un Certificado de Homologación Individual a que se refieren los decretos supremos N°54 y N°160, ambos de 1997 y del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, emitido a contar del 1 de septiembre de 2010, tendrá una vigencia de dos años.

El costo de la revisión técnica para buses y camiones ronda los \$24.000 CLP, según el promedio del tarifario disponible en www.prt.cl, actualizado en diciembre de 2024. Para vehículos eléctricos o aquellos que utilizan gas natural o GLP, este costo puede ser ligeramente superior. Los valores indicados incluyen la verificación de emisiones contaminantes y pueden variar según la región y la planta de revisión técnica seleccionada.

El tiempo que tome el trámite de revisión técnica dependerá de la concurrencia en la planta, ya que, en algunas fechas, especialmente con vehículos de clase B durante el mes de marzo, las plantas pueden estar saturadas. Sin embargo, durante el resto del año, que es cuando normalmente camiones y buses se presentan, es bastante probable que haya disponibilidad para realizar la revisión el mismo día o dentro de un par de días posteriores. Cabe destacar que el trámite se lleva a cabo en una sola visita a la planta de revisión técnica, a menos que el vehículo sea rechazado, en cuyo caso deberá someterse nuevamente a revisión en una segunda visita

Una vez superada la revisión, es necesario obtener el Permiso de Circulación. El costo del permiso de circulación para camiones y buses en Chile varía según varios factores, como el peso del vehículo, su antigüedad y el valor de tasación determinado por la municipalidad correspondiente. Generalmente, el valor del permiso de circulación para vehículos de carga y transporte público se calcula en función de un porcentaje sobre el valor de tasación del vehículo, que puede oscilar entre el 1,5% y el 2,5%. Para camiones y buses, el costo suele ser considerablemente más alto que para vehículos particulares, debido a su mayor tamaño y capacidad de carga. Además, la municipalidad de cada región puede tener variaciones en los valores aplicados, por lo que es recomendable consultar con la municipalidad local para obtener el valor exacto del permiso de circulación correspondiente. Este trámite debe renovarse anualmente y, en caso de ser rechazado el vehículo en la revisión técnica, se deberá realizar un nuevo trámite para obtener la autorización.

El trámite generalmente se puede realizar en un solo día, siempre y cuando el vehículo haya aprobado la revisión técnica y tenga todos los documentos en regla. Sin embargo, el tiempo exacto puede variar dependiendo de la municipalidad y de la demanda del momento. Durante los primeros meses del año, al igual que en el caso anterior, el proceso puede tardar más debido a la alta concurrencia de vehículos, particularmente los de clase B (vehículos livianos).

5.3.1.3.4 *Seguro Obligatorio de Accidentes Personales*

El **Seguro Obligatorio de Accidentes Personales (SOAP)** es un requisito esencial para todos los vehículos motorizados que transiten por las vías públicas de Chile. Este seguro proporciona cobertura en caso de accidentes personales, protegiendo tanto a los ocupantes del vehículo como a los terceros involucrados en el

incidente. El costo del SOAP para **camiones** oscila entre **\$19.250 y \$34.990 CLP**, dependiendo de la aseguradora seleccionada. En el caso de **buses de transporte de pasajeros**, los valores son algo más elevados y varían entre **\$49.990 y \$129.990 CLP**, según el tipo de bus (particular, turismo, rural o urbano). Estos costos para camiones y buses son aproximados y pueden variar según las condiciones del mercado. Para obtener información detallada y actualizada sobre las tarifas, es posible consultar la página de cada aseguradora, los valores referenciados en este documento corresponden a los valores presentes en <https://seguroservice.cl> en Enero de 2025.

Este seguro se puede adquirir en línea de manera rápida y eficiente, y el trámite toma solo 1 día para completarse.

5.3.1.4 Adaptaciones Adicionales

Si el vehículo requiere modificaciones específicas para cumplir con los requisitos del transporte de carga, como la instalación de GPS, etiquetas electrónicas, u otros dispositivos tecnológicos, estos ajustes deben ser realizados antes de comenzar a operar.

Si bien la Ley 19.872 define un Registro Nacional de Carga (creado en 2003, Ley 19.872, este solo los remolques y semirremolques cuyo Peso Bruto Vehicular (PBV) sea igual o superior a 3.860 kilogramos. Los remolques y semirremolques, cuyo peso no supere los 3.860 kilogramos. No existe actualmente un registro de camiones.

5.3.1.5 Autorización para Operar en el Sistema de Transporte Público (Buses)

5.3.1.5.1 Inscripción en el Registro Nacional de Servicios de Transporte de Pasajeros (RNSTP)

Según lo establecido por el artículo 2 del Decreto Supremo 212 de 1992 del MTT, dicho ministerio deberá llevar un Registro Nacional de Servicios de Transporte de Pasajeros (RNSTP) como catastro global en que deberán inscribirse todas las modalidades de servicios de transporte público remunerado de pasajeros, como, asimismo, los vehículos destinados a prestarlos.

La inscripción en RNSTP es un requisito obligatorio para cualquier bus que desee operar dentro del sistema de transporte público chileno. Este registro permite identificar y controlar los vehículos habilitados para prestar servicios de transporte de pasajeros, asegurando su conformidad con las normativas vigentes.

Entre los requisitos necesarios para completar la inscripción se encuentran:

- **Certificado de homologación:** Documento que acredita que el bus cumple con las especificaciones técnicas y normativas requeridas en Chile.
- **Certificado de Inscripción en el Registro de Vehículos Motorizados:** Los vehículos deben estar inscritos en el Registro de Vehículos Motorizados, y se debe presentar la documentación que acredite esta inscripción.
- **Seguro Obligatorio de Accidentes Personales (SOAP):** Este seguro cubre los riesgos asociados a posibles accidentes durante la operación del bus.
- **Certificado de revisión técnica y gases (vigente):** Garantiza que el vehículo se encuentra en condiciones mecánicas óptimas y cumple con las normas de emisiones contaminantes.

Es importante mencionar que es un trámite sin costo y el tiempo del proceso de inscripción depende de la revisión de los documentos y la complejidad del servicio, por lo que es recomendable consultar directamente con la Subsecretaría de Transportes para obtener detalles actualizados.

5.3.1.5.2 Postulación a un Servicio de Transporte Público

Una vez inscrito en el RNSTP, el siguiente paso es gestionar la autorización para operar en un sistema de transporte público específico. Si el bus se integrará en un sistema licitado, como RED (ex Transantiago) en Santiago o en servicios regionales, es necesario contactar al operador que tenga la concesión del servicio en la zona correspondiente.

En el caso de servicios de transporte público menor o de ámbito rural, es posible gestionar una autorización directa como microempresario del sector, lo cual suele implicar menos requisitos administrativos, pero está sujeto a regulaciones locales específicas.

Los costos asociados a este proceso varían según el tipo de servicio, región y modalidad de operación (licitación o autorización directa). El tiempo para obtener la autorización puede fluctuar significativamente, desde 1 mes hasta varios meses, dependiendo de los procesos administrativos, la disponibilidad de cupos y los requisitos establecidos por la autoridad de transporte.

Para que el bus pueda operar en rutas específicas dentro del sistema de transporte público chileno, es posible que sea necesario obtener permisos municipales o sectoriales, **especialmente en el caso de servicios rurales o interurbanos**. Estos permisos aseguran que el vehículo y su operación cumplan con los requisitos establecidos por las autoridades locales y regionales.

Los pasos principales incluyen:

- **Coordinación con la Secretaría Regional Ministerial de Transportes (Seremi):** Es fundamental gestionar los permisos directamente con la Seremi correspondiente a la región donde operará el bus.
- **Permisos municipales:** En algunos casos, se requiere la autorización de la municipalidad para operar en rutas dentro de su jurisdicción. Esto es especialmente relevante para servicios rurales que atraviesan zonas urbanas o interurbanas.

El costo de estos permisos varía dependiendo de la municipalidad o región y los requisitos específicos asociados a la operación del bus.

El tiempo necesario para obtener estos permisos depende de los procedimientos administrativos, la carga de trabajo de las autoridades locales y la complejidad de la ruta solicitada.

5.4 Duración de los Procesos

5.4.1 Proceso de Importación e Implementación

5.4.1.1 Homologación

El proceso de homologación puede tardar, dependiendo de la complejidad del vehículo y la carga de trabajo del 3CV. Según lo señalado por la Empresa Reborn Electric Motors, actualmente el proceso de homologación de un bus eléctrico dura unas **3 semanas** y ellos estiman que el de su bus a hidrógeno (que esperan realizar a comienzos



de 2025) dure no más de **3 meses**, por ser la primera vez que se realice. A futuro, se espera que la homologación tarde tiempos similares a los de los buses eléctricos. Estos tiempos debiesen ser similares para el caso de los camiones.

Al consultar al respecto al 3CV, se señaló que el proceso de solicitud suele durar unas dos semanas si es que se presenta la documentación completa, pero se extiende cuando no se presentan todos los antecedentes correspondientes. Posteriormente, este proceso considera una inspección del vehículo que no suele tomar más de 4 días. Según el 3 CV todo este proceso podría tomar unas **4 semanas en total**.

5.4.1.2 Importación

El tiempo estimado para completar los trámites de importación puede ser tan corto como **un día a una semana**, siempre y cuando los documentos sean entregados correctamente. La principal restricción en cuanto a tiempos depende de la exactitud y completitud de la documentación presentada por el agente de aduanas, quien juega un papel crucial en la agilidad del proceso.

5.4.1.3 Autorización para operar en el País

Primera Inscripción: La inscripción en el Registro de Vehículos Motorizados puede extenderse hasta **un plazo máximo de 30 días hábiles**, considerando diversos factores que inciden en su procesamiento. Este plazo está sujeto a la correcta presentación y completitud de la documentación requerida por parte del solicitante, así como a la carga laboral y operativa del organismo encargado. Además, es importante tener presente que los tiempos estimados podrían variar en función de la demanda administrativa en determinados periodos

Revisión Técnica: El tiempo que tome el trámite de revisión técnica dependerá de la concurrencia en la planta, ya que, en algunas fechas, especialmente con vehículos de clase B durante el mes de marzo, las plantas pueden estar saturadas. Sin embargo, durante el resto del año, que es cuando normalmente camiones y buses se presentan, es bastante probable que haya disponibilidad para realizar la revisión el **mismo día o dentro de un par de días posteriores**. Cabe destacar que el trámite se lleva a cabo en una sola visita a la planta de revisión técnica, a menos que el vehículo sea rechazado, en cuyo caso deberá someterse nuevamente a revisión en una segunda visita

Permiso de Circulación: El trámite generalmente se puede realizar en **un solo día**, siempre y cuando el vehículo haya aprobado la revisión técnica y tenga todos los documentos en regla. Sin embargo, el tiempo exacto puede variar dependiendo de la municipalidad y de la demanda del momento. Durante los primeros meses del año, al igual que en el caso anterior, el proceso puede tardar más debido a la alta concurrencia de vehículos, particularmente los de clase B (vehículos livianos).

Seguro Obligatorio de Accidentes Personales: Este seguro se puede adquirir en línea de manera rápida y eficiente, y el trámite toma **solo 1 día** para completarse.

5.4.1.4 Inscripción en Registro Nacional de Transporte de Pasajeros

Inscripción Registro Nacional de Transporte de Pasajeros: El tiempo del proceso de inscripción depende de la revisión de los documentos y la complejidad del servicio, por lo que es recomendable consultar directamente con la Subsecretaría de Transportes para obtener detalles actualizados, sin embargo, se puede considerar un estimado de **15 a 30 días hábiles** para la obtención del documento.



5.4.1.5 Resumen Proceso

A continuación, se presenta un resumen del proceso con los tiempos estimados, según lo revisado en los capítulos anteriores de este documento.

Es importante destacar que estos cálculos se realizan a modo de ejercicio y tienen como fin proporcionar una visión general del proceso.

Los tiempos pueden variar dependiendo de diversos factores, tales como la eficiencia de las organizaciones encargadas, la complejidad de cada trámite y la carga administrativa de los entes involucrados. Por lo tanto, se recomienda considerar estos valores como aproximaciones, sujeto a ajustes según las circunstancias particulares de cada caso.

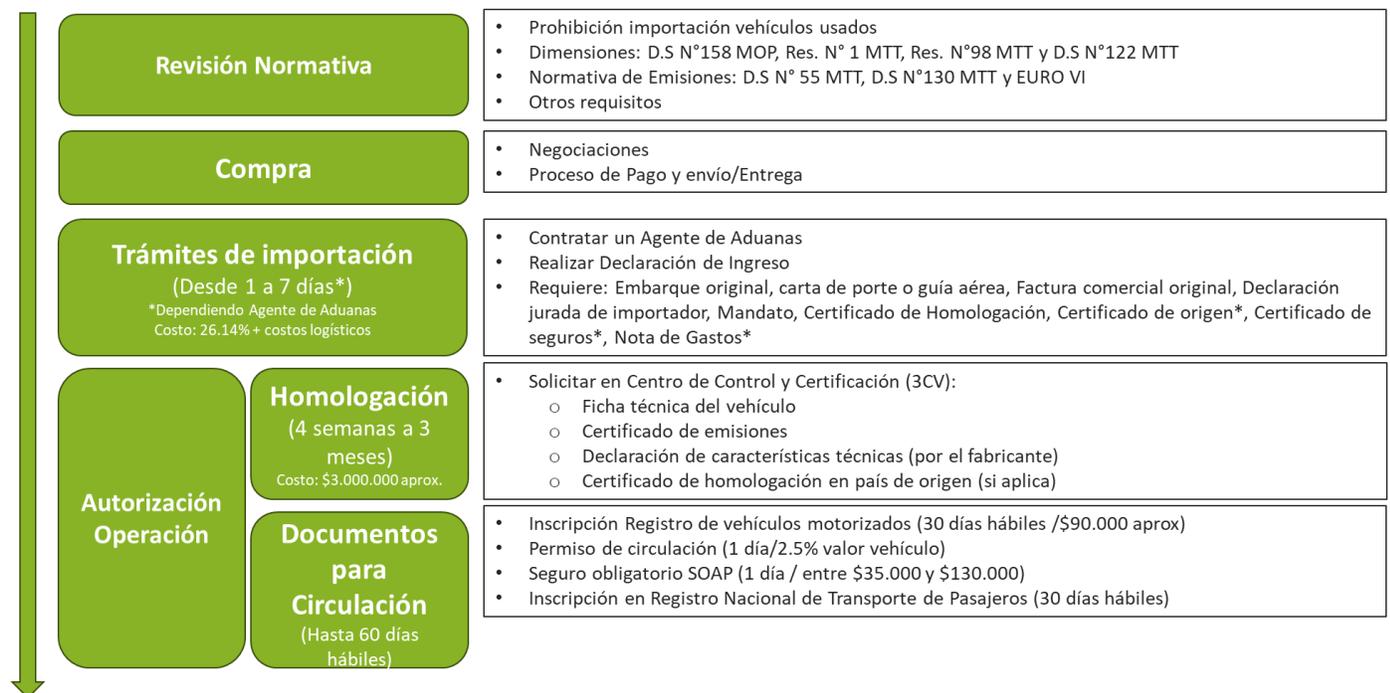


Figura 5-9: Proceso de importación e implementación de un vehículo pesado en Chile

Fuente: Elaboración Propia

5.4.2 Capacitación Personal

El Decreto 13 del Ministerio de Energía que reglamenta la seguridad de Instalaciones de Hidrógeno indica que todo el personal que trabaje en una Instalación de Hidrógeno deberá recibir anualmente una capacitación de los contenidos del Manual de Seguridad de la instalación. Esta capacitación deberá ser realizada por un profesional competente con atributos en la materia, incluyendo información e instrucciones específicas, en forma oral y escrita y que cuente con un registro de los contenidos incorporados. La capacitación además deberá contemplar la revisión de los sistemas de protección contra incendios, y para el caso de Instalaciones de Hidrógeno con capacidad agregada de almacenamiento superior a 5.000 kg, la capacitación se extenderá además a sus sistemas de control y extinción de incendios, para la brigada de emergencia. La capacitación deberá cumplir con los

requisitos señalados en la sección 4.11 de la NFPA2/2020 (normativa internacional “Hydrogen Technologies Code”).

A su vez, el mencionado reglamento modificó el reglamento de instaladores de gas (D.S. 191 de 1995 del Ministerio de Economía, Fomento), incluyendo en las instalaciones tipo 5 aquellas donde se desarrollan actividades de producción, acondicionamiento, almacenamiento, transferencia, suministro, abastecimiento y/o consumo de hidrógeno y a la licencia Clase 5, a la requerida por los profesionales autorizados para diseñar, proyectar, ejecutar y/o mantener este tipo de instalaciones. Los requisitos los profesionales de Licencia Clase 5 son los siguientes:

- Poseer el título de ingeniero civil o ingeniero de ejecución, en las especialidades de mecánica o química, o profesionales con título equivalente cuya condición de tal sea reconocida por la respectiva casa de estudios, o que estén habilitados para el ejercicio de dichas profesiones conforme a las disposiciones legales y reglamentarias vigentes en materia de equivalencia de estudios y convalidación de títulos.
- Certificado de aprobación de curso relacionado con el diseño y construcción de instalaciones de hidrógeno o instalaciones equivalentes, entendiéndose por tales para estos efectos, instalaciones que almacenen y/o procesen gases inflamables a presión y/o líquidos criogénicos inflamables, con un mínimo de 27 horas cronológicas, impartido por una universidad, instituto profesional, centro de formación técnica, empresa de ingeniería u otro organismo o entidad que en su giro se encuentre la capacitación técnica, o bien, un certificado de experiencia laboral en materias de diseño y construcción u operación de instalaciones de hidrógeno o instalaciones equivalentes, emitido por empresas relacionadas con el diseño y construcción u operación de instalaciones de hidrógeno o instalaciones equivalentes, que respalden su experiencia de al menos un año en dichas materias.

Por otro lado, con respecto a la operación de vehículos de hidrógeno. Se estima que también será necesaria la implementación de capacitaciones. Tomando como experiencia la experiencia de la implementación de la electromovilidad en Chile, esto ha requerido la capacitación de todos los conductores y la incorporación de personal experto en mantención del sistema eléctrico. De la conversación con Reborn Electric Motors, ellos señalaron que actualmente realizan dos capacitaciones, una sobre **riesgos** que debe tomar toda persona que trabaje con el bus y dura 3 horas y otra capacitación sobre el **trabajo con hidrógeno** que tiene una duración estimada de 5 horas.



6 Análisis de Casos de Aplicación

6.1 Planteamiento y Metodología

6.1.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es analizar casos de aplicación de vehículos eléctricos con celdas de combustible (FCEV) sobre rutas reales operadas actualmente con vehículos a diésel (ICEV) en dos regiones del país, determinando y comparando el desempeño energético y económico de ambas tecnologías. Con esto se obtendrán conclusiones sobre las ventajas y la competitividad relativa de los FCEV respecto a los ICEV y se determinará la factibilidad técnica y económica de incorporar estas nuevas tecnologías en diferentes contextos nacionales.

Además, para poder interpretar y proyectar, en la medida posible estos resultados, se sensibilizan los mismos casos con variables que afectan al consumo de los vehículos y a la explotación de éstos.

Así pues, se ha desarrollado un análisis técnico económico comparativo de transporte de mercancías y pasajeros mediante camiones o buses FCEV versus caso actual (ICEV) para recorridos reales en las regiones de Antofagasta y Biobío, incluyendo sensibilización de variables ajenas al recorrido.

Se han desarrollado modelos matemáticos para cada una de las tecnologías, los cuales se han simulado considerando recorridos reales y distintos vehículos comerciales, tanto de buses como camiones. Tal como se muestra en el diagrama siguiente, los resultados de las simulaciones de consumo de energía se procesan para llevar a cabo los análisis de explotación, que se centran en la determinación del TCO⁸ de cada aplicación con cada vehículo concreto.



Figura 6-1: Diagrama conceptual del proceso de análisis de caso

Fuente: Elaboración Propia

⁸ Total Cost of Ownership – Costo total de propiedad

La selección del TCO, el cual se desarrolla y detalla en el punto siguiente, como indicador principal de este análisis, responde a la voluntad de poder comparar los resultados de este trabajo con otros similares a nivel internacional, en los cuales éste es el indicador principal.

Seleccionado el TCO como indicador económico integrado, queda por definir el indicador asociado al consumo de energía que permita visualizar las variaciones en el desempeño de los vehículos. A pesar de que los combustibles presentan distintas características, densidades y costos, si expresamos el consumo de combustible en unidades de energía química contenida (no en masa o volumen) se logra expresar de forma comparable el desempeño real del vehículo y así contrastar el desempeño ambas tecnologías con el mismo rasero. Por lo anterior, se propone que el indicador energético a comparar sea el consumo de energía por kilómetro recorrido.

Con esto en consideración, se definen como variables de salida objetivo del análisis de casos:

- a) El consumo de energía por kilómetro asociado al recorrido analizado
- b) El TCO con un horizonte de evaluación correspondiente al menor ciclo de vida de los vehículos comparados⁹

6.1.2 Casos de Análisis y Sensibilización de Variables

El diseño del análisis busca comprender el máximo de fenómenos posibles y, especialmente, entender en qué condiciones, en qué tipo de servicios, las tecnologías FCEV son o pueden llegar a ser competitivas con la ICEV.

Para ello la definición de casos contempla escenarios centrales y sensibilizaciones a distintas variables.

Se definen como escenarios centrales las combinaciones de las siguientes casuísticas:

- a) Un recorrido de camión por cada una de las dos regiones (2)
- b) Un recorrido de bus por cada una de las dos regiones (2)
- c) Un modelo de bus ICEV
- d) Un modelo de bus FCEV
- e) Un modelo de camión ICEV
- f) Un modelo de camión FCEV

Lo que genera un total de 8 casos, comparables de 2 en 2:

- a) 4 casos de recorridos de camión (2 tecnologías por 1 recorrido por cada región)
- b) 4 casos de bus (2 tecnologías por 1 recorrido por cada región)

Esta estructura de casos centrales se resume esquemáticamente en la siguiente tabla

⁹ Se desarrolla y justifica esta propuesta más adelante

Tabla 6-1: Esquema de la tabla de casos a evaluar

	Región		
	Región 1	Región 2	
Vehículo	Camión ICEV	Caso 1	Caso 2
	Camión FCEV	Caso 3	Caso 4
	Bus ICEV	Caso 5	Caso 6
	Bus FCEV	Caso 7	Caso 8

Fuente: Elaboración propia

A efectos de sensibilización de variables, se diferencia entre variables técnicas, que afectan al consumo de energía de los recorridos y variables económicas. Se listan a continuación:

- Variables técnicas a sensibilizar:
 - o Velocidad y dirección del viento
 - o Temperatura ambiente

- Variables económicas a sensibilizar:
 - o Precio del hidrógeno
 - o Precio del diésel

Los 8 casos centrales se simularán con los valores nominales de cada una de las variables a sensibilizar generando la comparativa central. Tal como se ilustra en la figura a continuación, en ella se representa los valores de entrada al modelo dentro de un rango comprendido entre valores mínimos (en azul) y valores máximos (en rojo), luego el modelo obtiene un valor central de consumo energético, correspondiéndose con las condiciones nominales de entrada y una desviación con respecto a este valor, representada por las zonas rojas y azules sobre y bajo el valor central según se refiera a una desviación superior o inferior, respectivamente. Por último, al resultado central de consumo energético se utilizará para realizar el cálculo de indicadores económicos donde, nuevamente, las variables de entrada como los precios de los energéticos se ingresarán dentro de un rango comprometidos entre valores mínimos, en azul, y máximos, en rojo. Obteniendo, así, los indicadores económicos nominales y una desviación con respecto a este valor, representado en la figura como las zonas rojas y azules, según corresponda a la desviación superior o inferior, respectivamente.

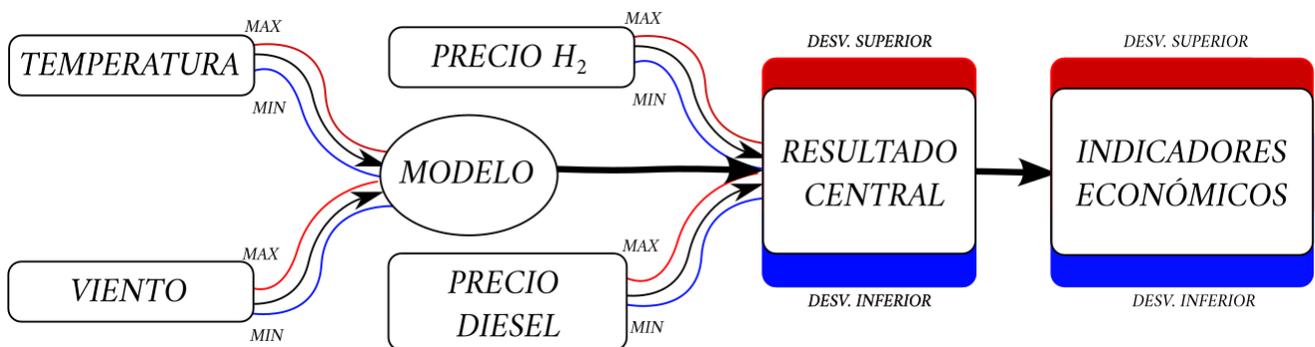


Figura 6-2: Diagrama de proceso de simulación de casos

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se sensibilizará cada variable técnica de forma individual (sin cruzar casos entre variables) para cada uno de los casos centrales generando 112 variaciones (distintas de los 8 casos base), asociados a 14 variaciones por cada uno de los 8 casos. Incluyendo los casos centrales y las variaciones de cada variable:

- 9 vientos
- 5 temperaturas

Ambas variables obtenidas a partir del registro anual de la dirección meteorológica para el año 2024 [79].

Esta sensibilización se hará sobre la variable objetivo técnica: el consumo de combustible del vehículo.

Finalmente, respecto a la variable objetivo económica, el TCO, se hará una sensibilización cruzada del precio de los combustibles. Para ello se obtendrán tres escenarios proyectados de los precios de los energéticos involucrados en el análisis, considerando una situación al alza, uno a la baja y otro neutro para cada uno. El cruce de estos escenarios resulta en un total de 72 combinaciones a evaluar, 9 por cada caso central.

6.1.3 Desarrollo de los Indicadores

6.1.3.1 Consumo de Energía Primaria

El indicador de consumo energético de los trayectos analizados es el consumo de energía contenida en el combustible consumido por kilómetro.

Dado que en ninguno de los ciclos se aprovecha el calor de condensación, se propone utilizar en ambos casos el poder calorífico inferior para hacer esta transformación de consumo de combustible a consumo de energía.

6.1.3.2 Desarrollo y Justificación del Costo Total de Propiedad (TCO)

Tal como se vio en los casos analizados de otros países, el indicador estándar para la comparativa asociada a la explotación económica de las flotas de vehículos es el Costo Total de Propiedad, TCO por sus siglas en inglés (Total Cost of Ownership), por ser el que mejor representa los gastos asociados a la explotación.

En esencia, el TCO representa todos los gastos asociados al vehículo a lo largo de su ciclo de vida en valor presente, desde la adquisición hasta su retiro del servicio, con o sin valor residual, e incluyendo todos los gastos operacionales vinculados al servicio y el mantenimiento.

Lo podemos calcular descompuesto en tres bloques en función de si se trata de costos de inversión, costos recurrentes anuales a lo largo de la vida del vehículo y costos indirectos y valor residual al final de esta. Se detallan a continuación dichos términos con participantes agrupados según el período temporal correspondiente:

- a) Costos de Adquisición
 - Precio de compra (excepto si existe leasing)
 - Costos de inversión en infraestructura asociada
 - Impuestos y/o aranceles
- b) Costos recurrentes
 - Financieros
 - Cuotas de leasing (en caso de existir)
 - Costos de financiamiento (en caso de financiamiento bancario)
 - Operación y mantenimiento
 - Mantenimiento preventivo y correctivo



- Repuestos y reparaciones
 - Seguros
 - Recambio de neumáticos
 - Peajes y otras tasas
 - Personal
 - Consumo de energía
- c) Costos de liquidación y valor residual
- Costos administrativos
 - Valor residual (venta del vehículo)

Los costos de adquisición son siempre en el año 1, los recurrentes se dan todos los años y los de liquidación en el año n, por lo que la fórmula de cálculo del TCO presenta tres términos dependiendo de la ocurrencia del gasto en el tiempo:

$$TCO = C_{adquisición} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{financieros,i} + C_{O\&M,i}}{(1+d)^i} - \frac{C_{admin} + V_{residual}}{(1+d)^n} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

$C_{adquisición}$: Representa todos los gastos de adquisición en el año 1.

$C_{financieros, i}$: Representa todos los gastos financieros en cada año i.

$C_{O\&M, i}$: Representa todos los gastos de operación y mantenimiento en cada año i.

C_{admin} : Representa los gastos administrativos de liquidación en el año n.

$V_{residual}$: Representa el valor de venta del vehículo en el año n.

n: Representa el número de años del ciclo de análisis.

d: Representa la tasa de descuento.

6.1.4 Hipótesis de Cálculo de Indicadores de Análisis

6.1.4.1 Generalidades

Se resumen a continuación las hipótesis generales:

- a) Para la determinación de la inversión se utilizarán precios de mercado de productos comerciales incluyendo sus impuestos y aranceles, pero sin considerar el IVA.
- b) No se considerará para ningún caso inversiones en infraestructura asociada.
- c) Para evitar ruido asociado a aspectos financieros, se considerará que la inversión se lleva a cabo con fondos propios.
- d) Dado que se trata de un análisis comparativo, no se considerarán los costos de personal asociado al manejo del vehículo ni seguros asociados al servicio.
- e) Tampoco se considerarán peajes o tasas asociadas a la operación.
- f) Los costos de mantenimiento y repuestos se considerarán en base a datos de bibliografía para cada caso.



6.1.4.2 Costos de Mantenimiento y Repuestos

A continuación, se presentan los valores considerados en el modelo de cálculo del costo de mantenimiento de vehículos de transporte pesado según el tipo de motor utilizado. Los valores considerados se encuentran en dólares. Sin embargo, el modelo contempla el valor del dólar observado el día 26/02/2024 reportado por el Banco Central [80] correspondiente a correspondiente a 940,99 CLP.

Tabla 6-2: Costo de mantenimiento de distintos vehículos

Tipo de Vehículo	Costo de mantenimiento USD/km
Diésel	0,123
Fuel Cell	0,093

Fuente: [81]

Adicionalmente, se considera según la misma fuente [81] que los vehículos con Fuel Cell deben incurrir en un gasto correspondiente a aproximadamente el 10% del precio del vehículo por concepto de rehabilitación (*refurbishment*) de la celda de combustible. **Este costo se incurriría aproximadamente al séptimo año de vida del vehículo.**

6.1.4.3 Costos de Combustible

Como se mencionó previamente en la sección 6.1.2, se busca conocer los indicadores económicos de los distintos vehículos para realizar la comparativa. Ante la imposibilidad de conocer con certeza el futuro, se ha optado por evaluar el comportamiento de la inversión bajo distintos escenarios económicos. En este sentido, se han determinado tres situaciones específicas para el precio de cada energético: al alza, a la baja y un último escenario neutral.

En el caso del diésel se ha utilizado como base las curvas presentadas por la Comisión Nacional de Energía en su informe de proyección de precios de combustibles para los años 2024 al 2044 [82]. Se ha utilizado el perfil de las curvas presentadas en el documento y el precio se ha escalado según el valor del combustible en la región a evaluar [83]. Con esto, se han generado las seis curvas de evolución del precio del diésel que se muestran en la Figura 6-3.

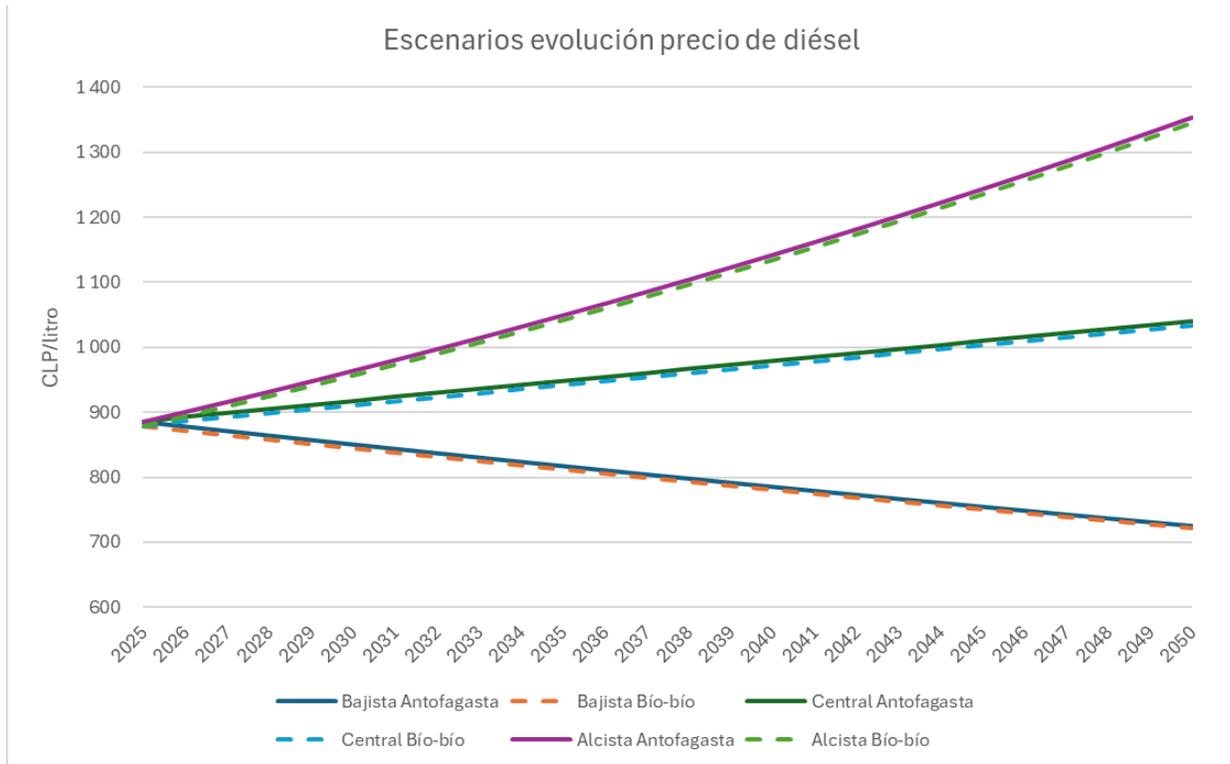


Figura 6-3: Proyecciones del precio del diésel en distintas regiones.

Fuente: Elaboración propia a partir de [82] y [83]

En el caso del precio del Hidrógeno, se han considerado los valores presentados por el Ministerio de Energía de Chile y las proyecciones que éste indica para el año 2023, considerando la situación presentada como el escenario optimista. Luego, los escenarios neutrales y pesimistas se estiman suponiendo que la previsión del Ministerio se aplaza cinco y diez años, respectivamente. Esta situación se ilustra a continuación en la Figura 6-4.

Cabe señalar que, aunque no existen a la fecha estimaciones de precio diferenciadas para ambas regiones, es posible que, en regiones con polos de mayor producción de hidrógeno verde, como podría ser Antofagasta, se puedan alcanzar precios más bajos que en otras regiones como Biobío, donde el potencial de generación de energía limpia es más acotado y que por ende, la producción local de hidrógeno pueda ser menor.

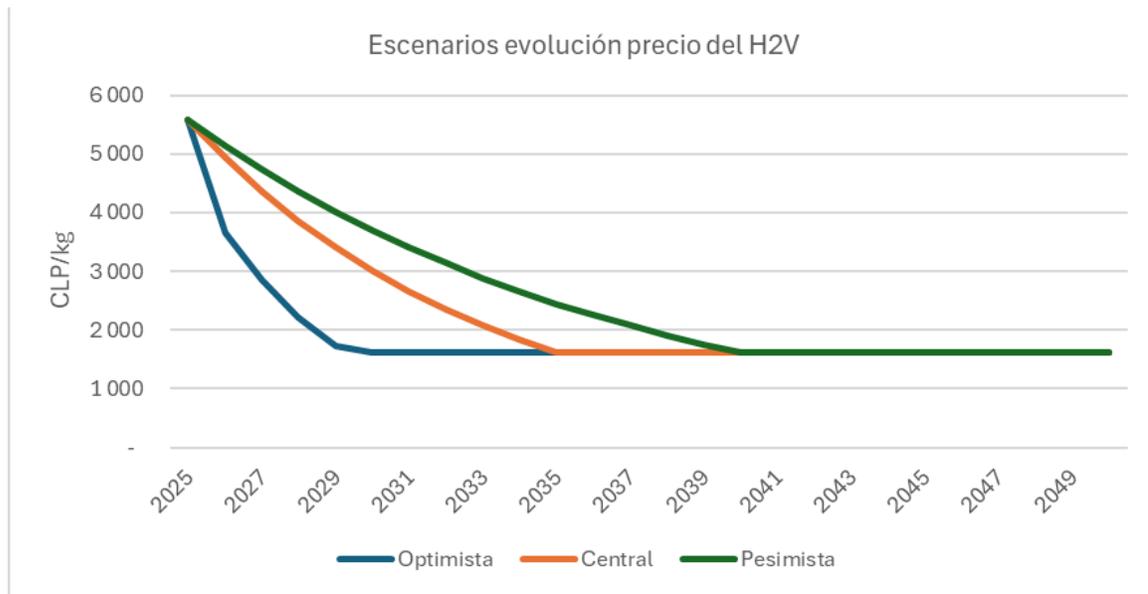


Figura 6-4: Proyecciones del precio del Hidrógeno en el país.

Fuente: Elaboración propia a partir de [84] [84]

Cabe señalar que, aunque la figura anterior parte de la base de un precio del kg de hidrógeno de entre 5 y 6 USD, valor documentado en [84], en base a conversaciones con empresas del rubro se ha informado que los precios actuales reales para utilización en vehículos a hidrógeno rondan los 25-30 USD/kg de hidrógeno gris. Esto principalmente debido a la aún falta de infraestructura y disponibilidad de oferta de hidrógeno en el país. Situación que debiera cambiar en el corto plazo en consideración a los proyectos de hidrógeno en ejecución.

6.1.4.4 Hipótesis Financieras

A continuación, se presentan las hipótesis financieras consideradas.

6.1.4.4.1 Costo de Inversión

El costo de inversión contempla el costo de obtener el activo a día de hoy en el país. Sin embargo, al tratarse de una tecnología emergente a nivel mundial, la información de los valores es escasa, por lo que se ha recurrido a estimación que se justifican caso a caso más adelante. Como se quiere realizar una proyección de la factibilidad en el tiempo, se ha utilizado una curva de evolución del precio de los vehículos a en los próximos años basándose en dos fuentes bibliográficas. La primera fuente [81] indica una leve alza de aproximadamente un 5% en los próximos años en el precio de los vehículos a diésel y una baja progresiva de hasta un 11% basado en curvas de aprendizaje para vehículos similares, lo cual según otros estudios se considera conservador, por lo tanto, se ha añadido una segunda referencia, la cual estima una curva más pronunciada en la caída de los precios de los vehículos con Fuel Cell, llegando a costar un 50% del valor actual el año 2035. Estas tres curvas se muestran en la Figura 6-5, en ella se grafica la fracción del costo de inversión de un vehículo con respecto al mismo costo el año 2025, por ejemplo, un camión que el año 2025 cuesta \$100.000 USD y al año siguiente sube a \$120.000 USD se representará con un factor 1,2 en el año 2026. Es por este motivo que las tres líneas comienzan en el valor 1 el año 2025.

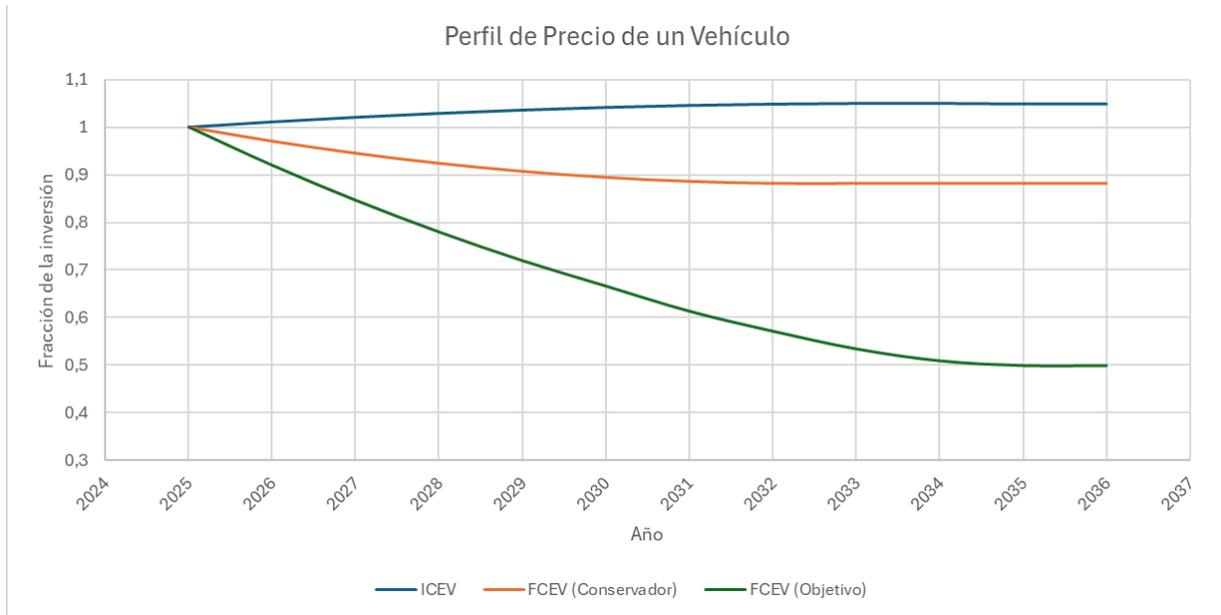


Figura 6-5: Proyecciones del precio de los vehículos.

Fuente: Elaboración propia a partir de [81] [81].

6.1.4.4.2 Depreciación del Activo

Para efectos de cálculo, se ha tomado como referencia que un vehículo se deprecia según la tabla de valores del SII [85], por lo cual se considera que todos los vehículos evaluados poseen una vida útil de 10 años. El valor residual del activo se considera, según la misma fuente como nulo al cabo de este tiempo.

6.1.4.5 Ciclo de Vida

El cálculo del TCO requiere la definición de un tiempo de ciclo de vida definido en años de operación del vehículo, pero las distintas tecnologías y/o modelos pueden tener tiempos de vida (kilómetros de funcionamiento) distintos, lo que obliga a buscar una forma de armonizar los análisis.

Para lograr esta armonización, que permita comparar los TCO, se analizarán los casos comparativos tomando el tiempo de vida del vehículo más restrictivo, esto es, el que tenga un tiempo de vida más corto y asignando al otro un valor residual en el cálculo del TCO determinado mediante una reducción lineal de su valor sobre su tiempo de vida nominal. Así, un vehículo con un tiempo de vida de 10 años analizado a 9 años tendría un valor residual del 10% de su precio de compra, el cual se actualizará a valor presente en la fórmula del TCO.

La determinación de los tiempos de vida en años de los vehículos se hará dividiendo su kilometraje máximo nominal facilitado por el fabricante por un valor de kilómetros anuales calculado en base al número de servicios diarios y distancia de servicio extrapolado al conjunto del año. Esto debido a la incertidumbre que se tiene con respecto a las características a largo plazo de los FCEV, dado que estos se encuentran en una etapa de desarrollo temprana en el mercado mundial.

6.2 Justificación Regiones a Analizar

Como parte de las tareas definidas en el estudio, estaba el análisis de casos de aplicación en dos regiones del país que a ser seleccionadas de entre cinco propuestas inicialmente en los Términos de Referencia:

- Región de Antofagasta
- Región de Valparaíso
- Región Metropolitana
- Región del Biobío
- Región de Magallanes

Se buscó que las dos regiones seleccionadas posean oportunidades para el desarrollo del hidrógeno, condiciones diferentes en el uso del transporte y condiciones geográficas distintas.

En este sentido surgió naturalmente el descarte de la Región Metropolitana debido a las condiciones particulares, con poca extensión para el desarrollo de grandes proyectos de energía, una gran cantidad de población concentrada en el Gran Santiago y un sistema de transporte público que se ha direccionado al uso de buses eléctricos.

Otra región que se descartó por sus particularidades es Magallanes, ya que posee un bajo uso del transporte de pasajeros y condiciones climáticas particulares que hacen la experiencia poco escalable a otras regiones. Magallanes sí posee oportunidades para el desarrollo de hidrógeno, pero no un mercado de transporte importante.

Valparaíso y Biobío son regiones que pueden considerarse como similares debido a la existencia de puertos, geografía similar con una ciudad que concentra la actividad económica de la región que son el Gran Valparaíso y Gran Concepción respectivamente, por lo tanto, es razonable considerar solo una de estas regiones.

Un factor importante que considerar es la existencia de oportunidades de desarrollo del hidrógeno, en este sentido la Región de Antofagasta podría posicionarse como un polo en la producción de hidrógeno debido al potencial de generación Solar de la región. En el caso de la Región del Biobío, esta cuenta con un plan de desarrollo regional de este tipo de tecnología por lo que es una mejor opción respecto a la Región de Valparaíso.

Respecto a las condiciones del uso de transporte la Región de Antofagasta, posee alto tráfico de vehículos de carga, asociado a la actividad minera y polos de desarrollo distantes, lo que añade requerimiento de autonomía en los vehículos. La región del Biobío también posee alto tráfico de camiones asociado a actividades industriales, forestales y portuaria, además posee un alto uso de transporte público tanto urbano como interurbano.

Ambas regiones además contrastan respecto a la geografía, por lo tanto, son una opción interesante para evaluar condiciones diferentes de operación de buses y camiones de hidrógeno.

6.3 Contexto de Regiones de Antofagasta y Biobío desde el punto de Vista de Transporte

6.3.1 Crecimiento Histórico Poblacional

A nivel poblacional, las regiones de Antofagasta y el Biobío han experimentado un crecimiento continuo durante los últimos 20 años. De acuerdo con la información obtenida de los censos de 2002, 2012 y 2017, y las proyecciones de población realizadas por el INE, la evolución histórica de la cantidad de habitantes por región en los últimos 20 años se muestra en la Tabla 6-3 y la Figura 6-6.

Tabla 6-3: Crecimiento histórico poblacional a nivel nacional y en las regiones de Antofagasta y del Biobío

Año	2005	2010	2015	2020	2025
Nacional	16.183.489	17.063.927	17.971.423	19.458.310	20.206.953
Antofagasta	524.422	562.331	604.877	691.854	722.120
Biobío	1.512.375	1.564.894	1.617.128	1.663.696	1.690.616

Fuente: Proyecciones de Población INE.

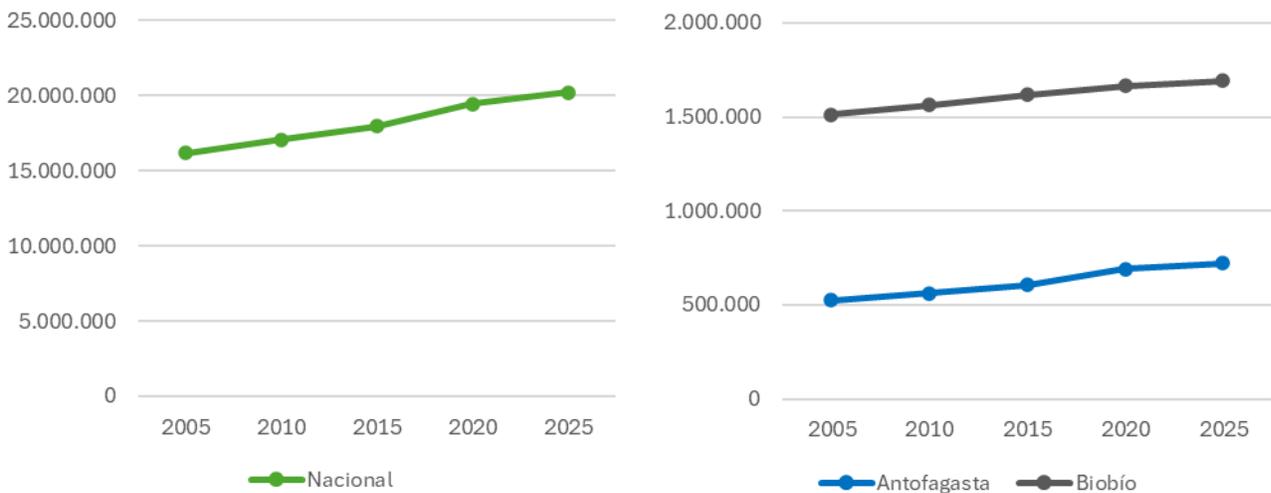


Figura 6-6: Crecimiento histórico poblacional a nivel Nacional y regional de Antofagasta y del Biobío.

Fuente: Proyecciones de Población INE.

Se puede observar que la región del Biobío ha mantenido su superioridad a nivel de habitantes en las últimas dos décadas. Las tasas de crecimiento anual en intervalos de 5 años se muestran en la Tabla 6-4 y Figura 6-7, donde se observa que, en promedio, la tasa de crecimiento anual de población de la región de Antofagasta ha sido mayor que la de la región del Biobío, e incluso mayor que la tasa de crecimiento anual nacional, alcanzando un máximo en el intervalo entre 2015 y 2020 del 2,88%. La tasa de crecimiento del Biobío, en tanto, está caracterizada por su tendencia decreciente entre intervalos.

Tabla 6-4: Tasas anuales de crecimiento poblacional a nivel nacional y de las regiones de Antofagasta y del Biobío

Intervalo	2005-2010	2010-2015	2015-2020	2020-2025
Nacional	1,09%	1,06%	1,65%	0,77%
Antofagasta	1,45%	1,51%	2,88%	0,87%
Biobío	0,69%	0,67%	0,58%	0,32%

Fuente: Proyecciones de Población INE.

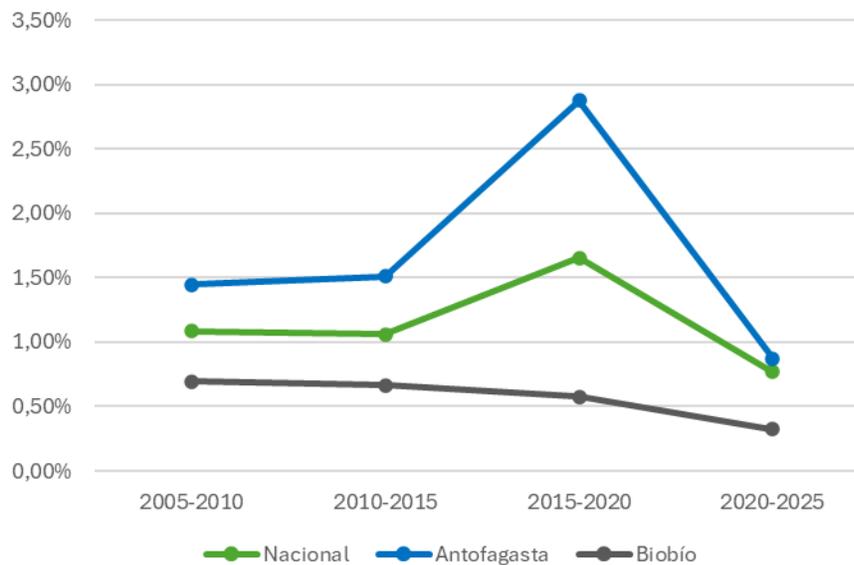


Figura 6-7: Tasas de crecimiento poblacional anual a nivel Nacional y regional de Antofagasta y del Biobío

Fuente: Proyecciones de Población INE

El crecimiento histórico poblacional en las últimas décadas, así como la tasa anual de crecimiento en las comunas más importantes de la región de Antofagasta se muestran en las tablas 6-5 y 6-6, y la Figura 6-8. En ellas, se observa no solo que Antofagasta es la comuna más poblada de la región, sino que es también la comuna que mayor crecimiento registra en las últimas décadas, presentando un crecimiento incluso mayor a la media nacional, contrario a la comuna de Calama que presenta un crecimiento más lento.

Tabla 6-5: Crecimiento histórico poblacional a nivel comunal en la Región de Antofagasta.

Año	2005	2010	2015	2020	2025
Calama	147.681	156.978	167.284	190.336	196.820
Antofagasta	315.097	340.633	369.028	425.725	447.224

Fuente: Proyecciones de Población INE.

Tabla 6-6: Tasas de crecimiento poblacional anual a nivel comunal en la región de Antofagasta.

Intervalo	2005-2010	2010-2015	2015-2020	2020-2025
Calama	1,26%	1,31%	2,76%	0,68%
Antofagasta	1,62%	1,67%	3,07%	1,01%

Fuente: Proyecciones de Población INE.

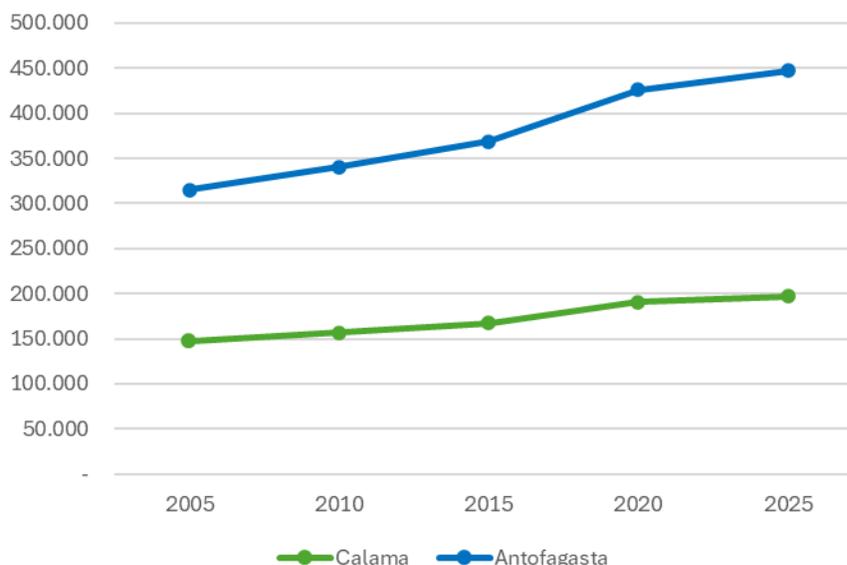


Figura 6-8: Crecimiento histórico poblacional a nivel comunal en la Región de Antofagasta

Fuente: Proyecciones de Población INE.

En el caso de la Región del Biobío, sus ciudades más importantes se muestran en las tablas 6-7 y 6-8, y Figura 6-9, junto a su crecimiento histórico poblacional y las tasas de crecimiento anual correspondientes. En este análisis se incluye la comuna de Chillán, que hasta el año 2018 formaba parte de la región del Biobío y representa un importante generador y atractor de viajes, particularmente para el Gran Concepción.

La zona denominada Gran Concepción incluye las comunas de: Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualpén, Lota, Penco, San Pedro de la Paz, Talcahuano, Hualqui y Tomé.

De las mediciones y proyecciones realizadas, se puede observar que el Gran Concepción concentra gran parte de la población de la región, aunque se ha caracterizado por un lento crecimiento en las últimas décadas. En el caso de Chillán y Los Ángeles, su crecimiento ha seguido una tendencia más cercana a la nacional, aunque algo mayor para la comuna de Los Ángeles, durante la década de 2005 a 2015, siendo similar la población de ambas comunas.

Tabla 6-7: Crecimiento histórico poblacional a nivel ciudad en la Región del Biobío y la ciudad de Chillán.

Año	2005	2010	2015	2020	2025
Gran Concepción	941.952	973.631	1.007.047	1.037.170	1.054.788
Los Ángeles	183.670	197.269	208.833	218.515	224.828
Chillán	173.980	181.766	189.759	198.624	205.318

Fuente: Proyecciones de Población INE.

Tabla 6-8: Tasas de crecimiento poblacional anual a nivel ciudad en la Región del Biobío y la ciudad de Chillán.

Intervalo	2005-2010	2010-2015	2015-2020	2020-2025
Gran Concepción	0,67%	0,69%	0,60%	0,34%
Los Ángeles	1,48%	1,17%	0,93%	0,58%
Chillán	0,90%	0,88%	0,93%	0,67%

Fuente: Proyecciones de Población INE.

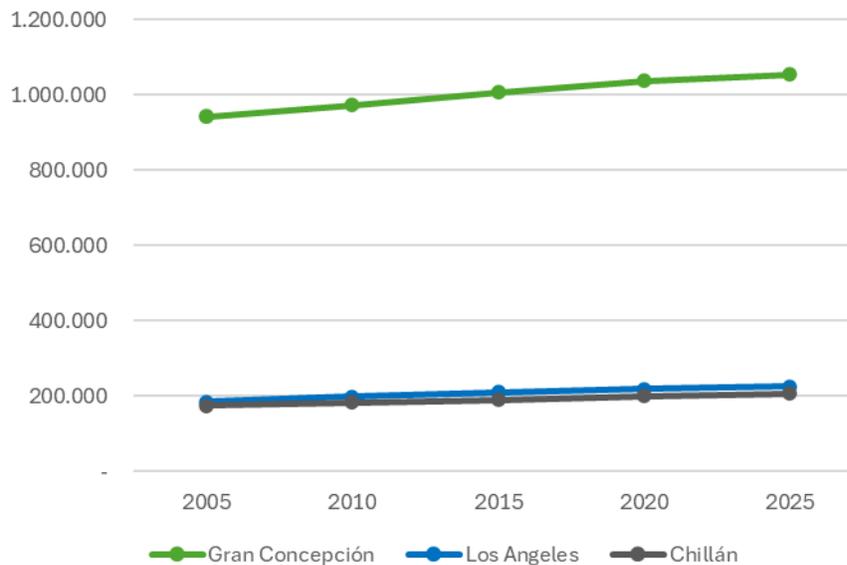


Figura 6-9: Crecimiento histórico poblacional a nivel ciudad en la Región de Biobío y la ciudad de Chillán

Fuente: Proyecciones de Población INE.

6.3.2 Evolución Histórica de Permisos de Circulación y Tipo de Motorización

En cuanto a los permisos de circulación en ambas regiones, se estudia su evolución histórica entre los años 2008 y 2023, considerando cortes temporales cada cinco años. La información recopilada se muestra en la Tabla 6-9 y Figura 6-10, en donde se observa que, como es esperable, la cantidad de permisos de circulación en la Región del Biobío es considerablemente mayor a la de la Región de Antofagasta. Además, se observa que la Región de Antofagasta ha experimentado un crecimiento continuo del número de permisos de circulación, lo que no ocurre en la Región del Biobío, donde se observa un decrecimiento en el número entre 2013 y 2018, aunque los períodos de crecimiento son considerablemente más intensos.

Tabla 6-9: Crecimiento histórico de Permisos de Circulación en las regiones de Antofagasta y del Biobío.

Región	2008	2013	2018	2023
Antofagasta	109.953	161.753	167.406	177.640
Biobío	300.476	444.000	434.336	533.653

Fuente: Estadísticas de Permisos de Circulación INE.

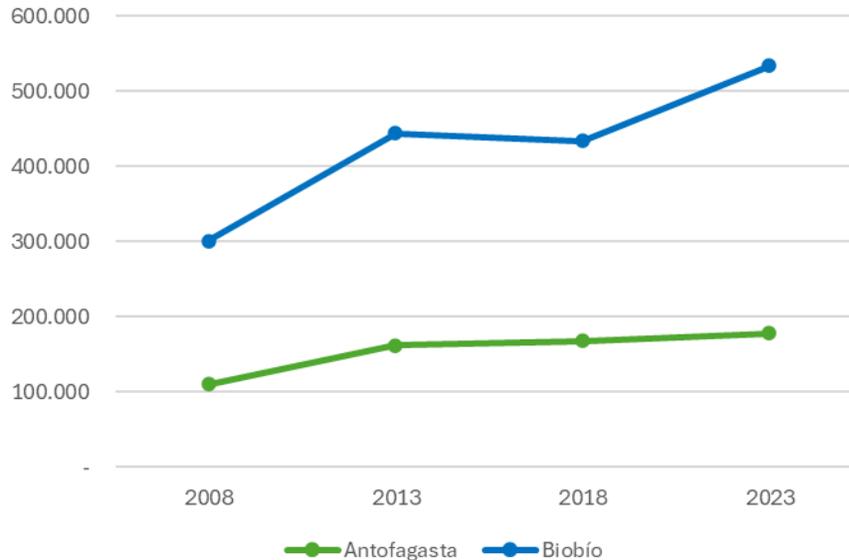


Figura 6-10: Crecimiento histórico de Permisos de Circulación en las regiones de Antofagasta y del Biobío.

Fuente: Estadísticas de Permisos de Circulación INE.

La evolución histórica del número de permisos de circulación en las comunas más importantes de la Región de Antofagasta se muestra en la Tabla 6-10, en donde, como es esperable, la comuna de Antofagasta concentra la mayoría de estos, existiendo incluso un período en el que la comuna de Calama sufre un decrecimiento en el número de permisos de circulación, al contrario de la tendencia regional.

Tabla 6-10: Crecimiento histórico de Permisos de Circulación a nivel comunal en la región de Antofagasta.

Comuna	2008	2013	2018	2023
Calama	33.818	50.370	48.902	51.159
Antofagasta	62.842	92.455	98.125	103.298

Fuente: Estadísticas de Permisos de Circulación INE.

En el caso de las principales ciudades de la Región del Biobío y la ciudad de Chillán, el crecimiento de los permisos de circulación es continuo en los períodos analizados, reflejándose el aumento de la importancia relativa a nivel regional de las comunas del Gran Concepción. Esto se observa en la tabla 6-11.

Tabla 6-11: Crecimiento histórico Permisos de Circulación en las principales ciudades de la región del Biobío y la ciudad de Chillán.

Comuna	2008	2013	2018	2023
Gran Concepción	156.351	219.956	270.564	325.502
Los Ángeles	33.295	44.567	58.714	65.812
Chillán	29.556	43.918	50.874	52.149

Fuente: Estadísticas de Permisos de Circulación INE.

La evolución histórica del tipo de motorización a nivel regional se muestra en la Tabla 6-12, para las regiones de Antofagasta y el Biobío. Adicionalmente se muestra la evolución histórica en la región de Ñuble, para poder expandir los resultados en la comuna de Chillán.

Tabla 6-12: Evolución de la proporción del tipo de motorización en las regiones de Antofagasta y del Biobío.

Región	Año	Tipo de Motor			
		Bencinero	Diésel	Gas	Eléctrico
Antofagasta	2008	76,68%	23,32%	0,00%	0,00%
	2013	72,01%	27,99%	0,00%	0,00%
	2018	71,29%	28,68%	0,01%	0,01%
	2023	70,93%	28,88%	0,00%	0,18%
Biobío	2008	76,13%	23,72%	0,15%	0,00%
	2013	73,22%	26,76%	0,01%	0,00%
	2018	74,75%	25,22%	0,01%	0,01%
	2023	73,52%	26,10%	0,24%	0,14%
Ñuble	2008	-	-	-	-
	2013	-	-	-	-
	2018	69,89%	30,09%	0,02%	0,01%
	2023	68,95%	30,96%	0,02%	0,07%

Fuente: Estadísticas de Permisos de Circulación INE.

Al analizar la tabla anterior es evidente, en todo tipo de vehículo con permiso de circulación emitido, el dominio de la motorización en base a combustibles convencionales por sobre los motorizados a gas y eléctricos. Si bien, en los últimos años, se observa un crecimiento de estos últimos, particularmente en el caso de los vehículos motorizados eléctricamente, la brecha aún es enorme, tal como se observa en el gráfico de la Figura 6-11, en el que no se alcanza a distinguir las componentes asociadas a los vehículos impulsados a gas y electricidad, por su baja cantidad en relación con los impulsados por bencina y diésel.

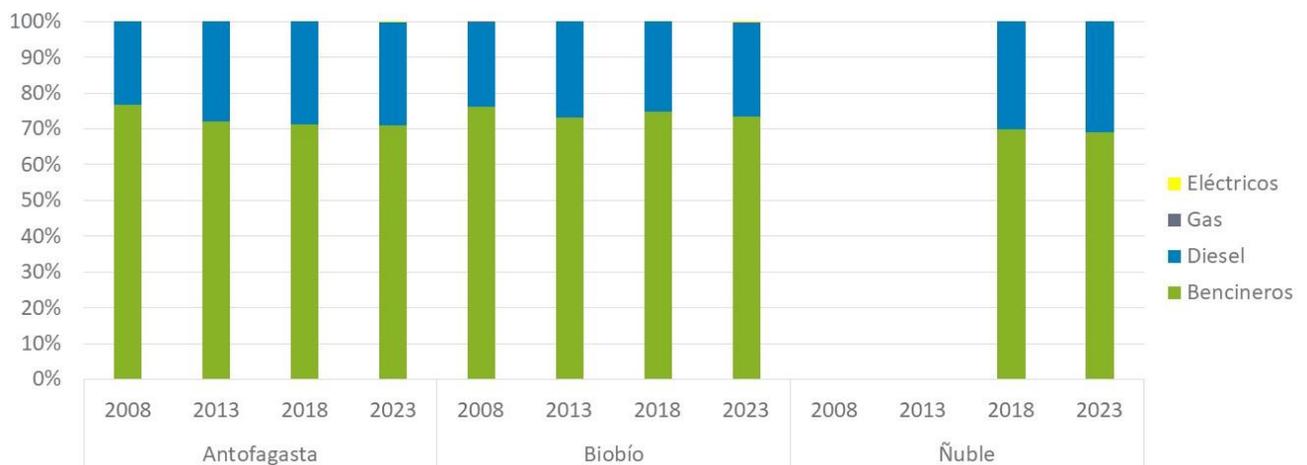


Figura 6-11: Evolución de la proporción del tipo de motorización en las regiones de Antofagasta y del Biobío.

Fuente: Estadísticas de Permisos de Circulación INE.

En base a la proporción regional observada para el tipo de motorización en cada corte temporal, se expande esta proporción obteniéndose una proyección de la evolución histórica del tipo de motorización en las principales comunas y ciudades de cada región analizada, las que se muestran en las tablas 6-13 y 6-14.

Tabla 6-13: Estimación evolución de proporción del tipo de motorización a nivel comunal en Región de Antofagasta.

Región	Año	Tipo de Motor			
		Bencinero	Diésel	Gas	Eléctrico
Calama	2008	25.931	7.887	0	0
	2013	36.270	14.099	0	0
	2018	34.688	14.125	2	88
	2023	36.289	14.777	2	92
Antofagasta	2008	48.187	14.655	0	0
	2013	66.575	25.879	1	0
	2018	69.603	28.342	3	176
	2023	73.273	29.836	3	185

Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas de Permisos de Circulación INE.

Tabla 6-14: Estimación evolución de proporción del tipo de motorización a nivel comunal en Región de Biobío y ciudad de Chillán.

Región	Año	Tipo de Motor			
		Bencinero	Diésel	Gas	Eléctrico
Gran Concepción	2008	119.036	37.081	234	0
	2013	161.060	58.867	26	3
	2018	202.246	68.247	39	32
	2023	239.314	84.944	776	468
Los Ángeles	2008	25.349	7.896	50	0
	2013	32.634	11.927	5	1
	2018	43.889	14.810	8	7
	2023	48.386	17.174	157	95
Chillán	2008	22.502	7.010	44	0
	2013	32.158	11.754	5	1
	2018	35.553	15.307	9	4
	2023	35.954	16.144	13	39

Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas de Permisos de Circulación INE.

6.3.3 Composición Vehicular

Para estudiar la composición vehicular en las regiones, se considerará la información publicada por las Plantas de Revisión Técnica (PRT) para el año 2024.

En el caso de la región de Antofagasta un total de 167.754 vehículos aprobaron su revisión, de los cuales algo más del 86% corresponde a vehículos livianos, seguidos por un 8% de camiones y un 6% de buses. El detalle de esto se muestra en la Tabla 6-15.

Tabla 6-15: Revisiones técnicas aprobadas por tipo de vehículo el año 2024 en la Región de Antofagasta.

Tipo Vehículo	Revisiones Técnicas Aprobadas 2024	Proporción c/r al total de revisiones aprobadas
Livianos	144.307	86,02%
Buses Urbanos	9.156	5,46%
Buses Interurbanos	806	0,48%
Camiones	13.485	8,04%

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

En la Tabla 6-16 se muestra el año promedio de fabricación, el kilometraje promedio y el promedio de kilómetros recorridos por año por tipo de vehículos de aquellos que aprobaron el proceso de revisión técnica. Como se puede observar, la antigüedad promedio de los vehículos ligeros es mayor que la de los vehículos pesados, aunque su kilometraje promedio y, por ende, la cantidad de kilómetros recorridos anualmente son considerablemente menores. De los vehículos pesados, el tipo de vehículo que en promedio más kilómetros recorre son los buses interurbanos, debido a la naturaleza de sus viajes, los que se realizan principalmente fuera de sectores urbanos.

Tabla 6-16: Año de fabricación y kilometraje promedios por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la Región de Antofagasta.

Tipo Vehículo	Promedio Año de Fabricación	Promedio Kilometraje	Promedio km/año
Livianos	2014	130.564	11.379
Buses Urbanos	2018	233.811	32.237
Buses Interurbanos	2018	464.375	58.861
Camiones	2017	215.875	26.319

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

Las figuras 6-12 y 6-13 muestran histogramas del año de fabricación y el kilometraje de los vehículos al momento de la revisión por cada tipo de vehículo que aprobó el proceso de revisión técnica durante el año 2024 en la región de Antofagasta. Para una mejor lectura se han separado los vehículos livianos de los pesados. El histograma de vehículos pesados considera de forma sobrepuesta (no apilada) buses urbanos, interurbanos y camiones.

En cuanto al año de fabricación se observa que en vehículos pesados existe una mayor cantidad de vehículos nuevos, lo que motiva una importante cantidad de vehículos con bajo kilometraje, especialmente en camiones. Sin embargo, la dispersión del kilometraje para los vehículos pesados decrece más lento que la de los vehículos livianos a medida que aumenta el kilometraje, lo que explica el mayor promedio de kilómetros de los primeros.

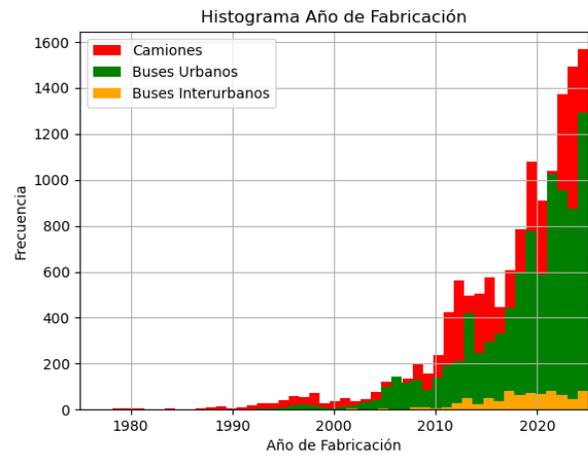
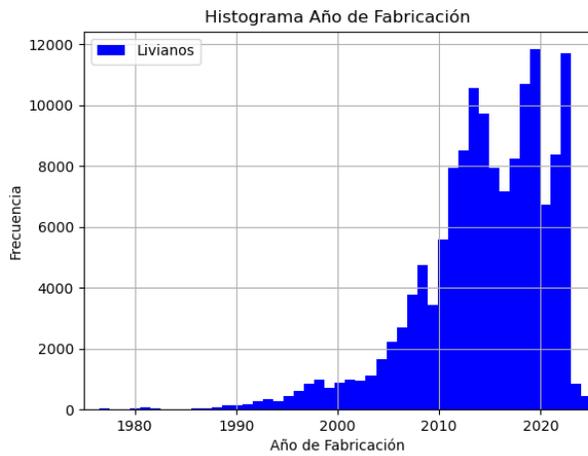


Figura 6-12: Histograma año de fabricación por tipo de vehículo con revisión aprobada año 2024 en Región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

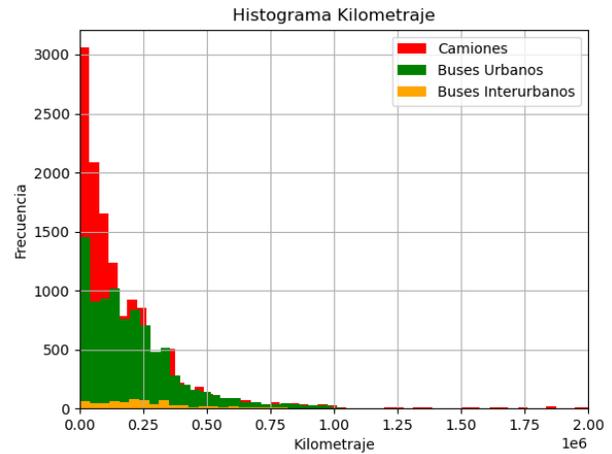
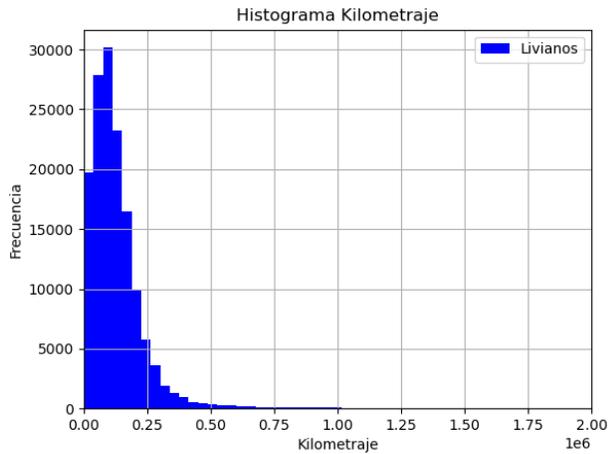


Figura 6-13: Histograma del kilometraje al momento de la revisión por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la Región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

En el caso de la región del Biobío, durante el año 2024 un total de 503.341 vehículos aprobaron el proceso de revisión técnica, siendo en su gran mayoría vehículos livianos, correspondiendo a poco más del 93%, una cantidad y proporción considerablemente mayores que las observadas en la región de Antofagasta. Si bien el número de vehículos pesados también es mayor en esta región, representan una proporción bastante menor del total de vehículos que aprobaron la revisión, siendo cercano al 7%, cuya mayor parte la representan los camiones. El detalle de lo anterior se muestra en la Tabla 6-17.

Tabla 6-17: Revisiones técnicas aprobadas por tipo de vehículo el año 2024 en la región del Biobío.

Tipo Vehículo	Revisiones Técnicas Aprobadas 2024	Proporción c/r al total de revisiones aprobadas
Livianos	469.473	93,27%
Buses Urbanos	13.218	2,63%
Buses Interurbanos	789	0,16%
Camiones	19.861	3,95%

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

En cuanto a la antigüedad de los vehículos, a partir de la Tabla 6-18 se puede observar que, en general, los vehículos de la región del Biobío son más antiguos que los de Antofagasta, no existiendo tanta variación de la antigüedad promedio por tipo de vehículo. En cuanto al kilometraje promedio, también es mayor para la región del Biobío, motivado por la mayor antigüedad, ya que, salvo en el caso de buses interurbanos, los kilómetros recorridos en promedio por año son menores para esta región.

Tabla 6-18: Año de fabricación y kilometraje promedios por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la región del Biobío.

Tipo Vehículo	Promedio Año de Fabricación	Promedio Kilometraje	Promedio km/año
Livianos	2012	165.277	11.887
Buses Urbanos	2013	314.852	25.011
Buses Interurbanos	2015	789.576	91.235
Camiones	2012	258.604	20.863

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

En cuanto a la distribución de los años de fabricación y el kilometraje de los vehículos al momento de la revisión de aquellos que aprobaron el proceso de revisión durante el año 2024 en la región del Biobío, que se muestran en las figuras 6-15 y 6-16, no se observan grandes diferencias en las tendencias respecto de aquellas observadas en la región de Antofagasta. Lo más notorio se observa en que la distribución de los años de fabricación de los vehículos pesados tiene una distribución algo más uniforme en los últimos 15 años, lo que genera la mayor antigüedad promedio.

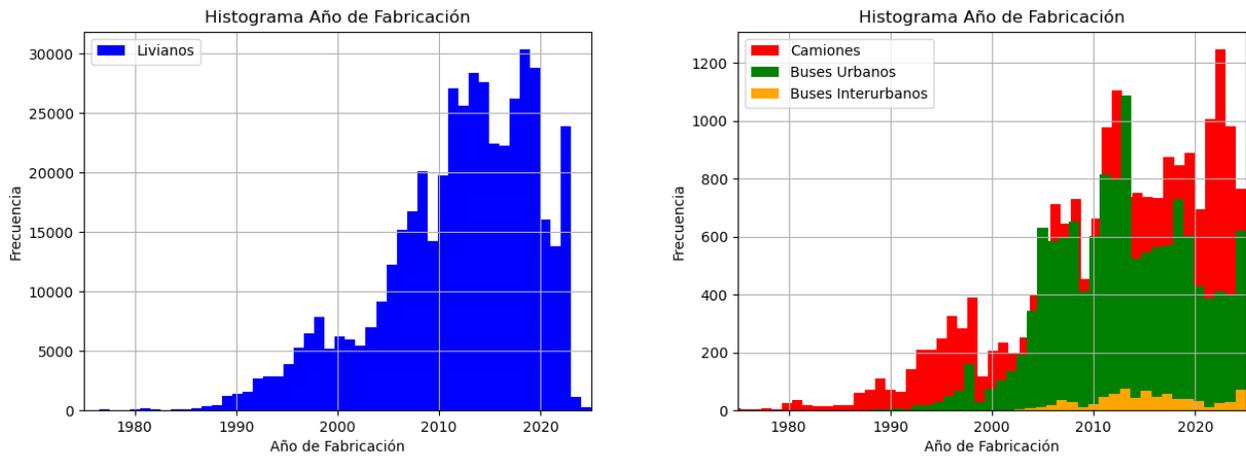


Figura 6-14: Histograma del año de fabricación por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

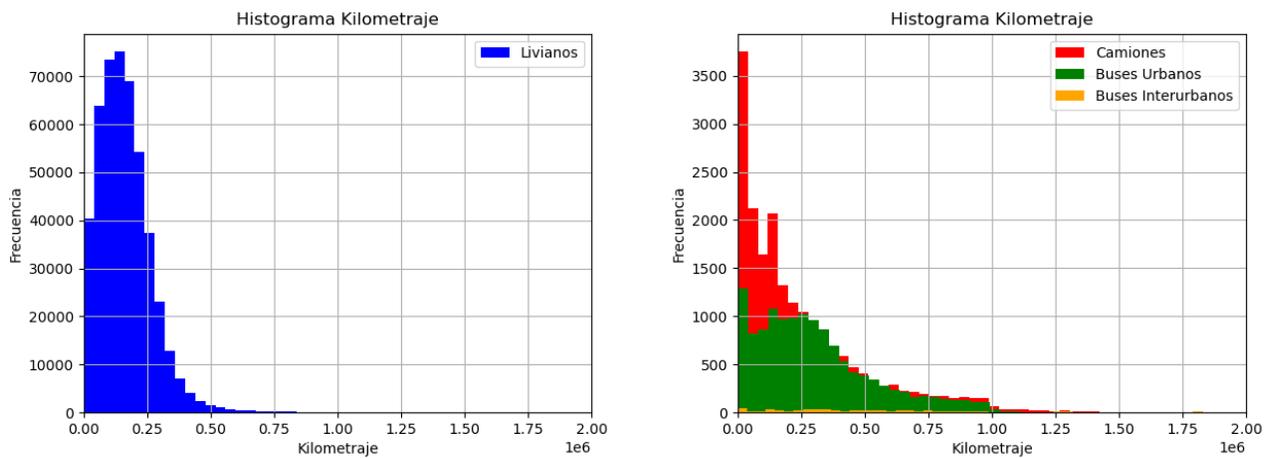


Figura 6-15: Histograma del kilometraje al momento de la revisión por tipo de vehículo con revisión aprobada el año 2024 en la región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos Plantas PRT 2024.

6.3.4 Identificación de Principales Rutas

Las principales rutas de la región de Antofagasta, calificadas así por el flujo de vehículos reportado en el Plan Nacional de Censos, se muestran en la Tabla 6-19, en donde se describe su longitud y sus principales conexiones, y se muestran en la Figura 6-16. Se catastran un total de 11 rutas diferentes, entre las que figura la Ruta 1, que está dividida en dos tramos inconexos entre sí. En base a la composición de rutas se evidencia la importancia de

las comunas de Antofagasta y Calama, ya que numerosas rutas tienen como origen, punto intermedio o destino estas comunas. También destaca la comuna de Tocopilla, aunque solo está conectada por dos rutas.

Tabla 6-19: Principales rutas Región de Antofagasta, su longitud y sectores que conecta.

Ruta	Longitud (Km)	Sectores que conecta
1 Norte	280.9	Región de Tarapacá, Tocopilla, Antofagasta
1 Sur	171.4	El Cobre, Paposo, Taltal, Ruta 5 (Las Breas)
5	600.4	Eje Longitudinal Estructurante
21	196.5	Calama, Ollagüe (paso fronterizo)
23	311.1	Calama, San Pedro de Atacama, Huatiquina (paso fronterizo)
24	154.7	Tocopilla, Ruta 5 (Unión Candelaria), Chuquicamata, Calama
25	120.3	Ruta 5 (Oficina Chacabuco), Calama
26	15.4	Antofagasta, Ruta 5 (Uribe)
27	158.3	San Pedro de Atacama, Jama (paso fronterizo)
28	15.7	Antofagasta, Ruta 5 (La Negra)
B-710	110.2	Paposo, Ruta B-700
B-700	56.8	El Cobre, Ruta 5

Fuente: Elaboración Propia.

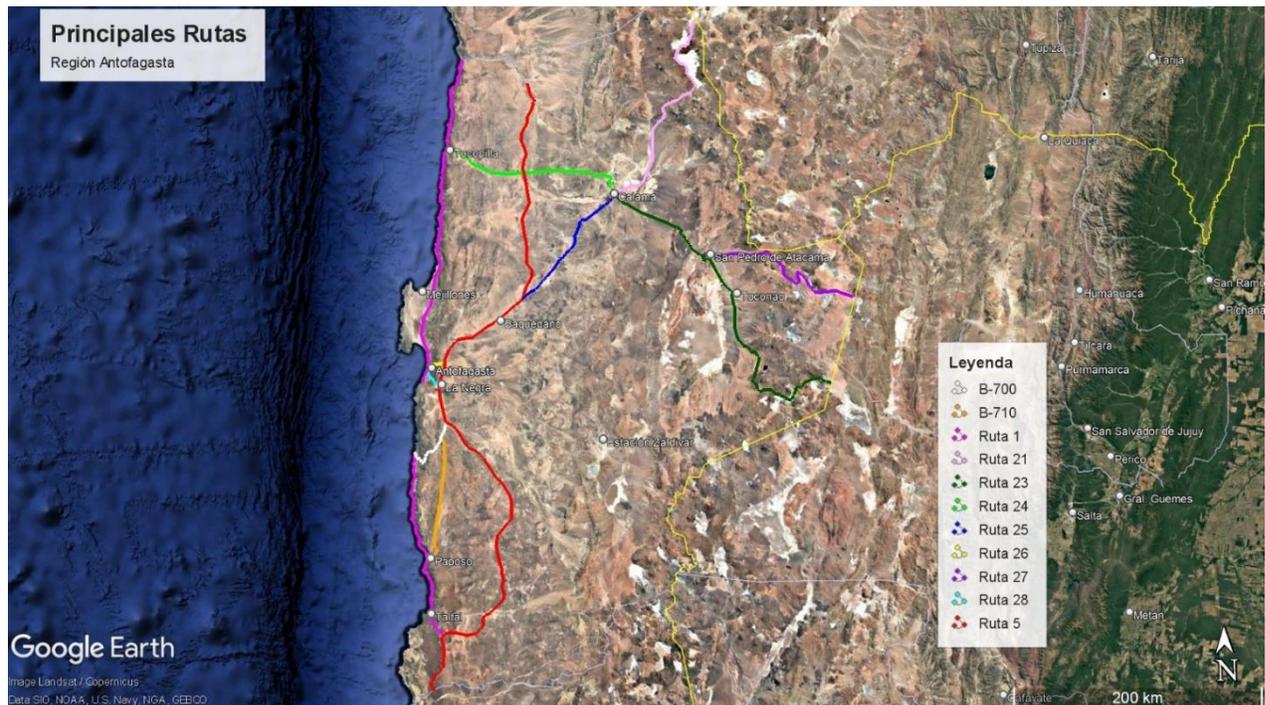


Figura 6-16: Principales rutas Región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Los perfiles de elevación corresponden a una representación gráfica de la altitud de una determinada ruta. En el caso de las principales rutas de la Región de Antofagasta, el perfil de elevación de cada una de ellas se muestra en el Anexo 9.5.1.

Las principales rutas de la región del Biobío y sus conexiones con la comuna de Chillán se muestran en la Tabla 6-20, junto con su longitud y los lugares que conecta. Se consideran un total de 24 rutas, un número bastante mayor que las catastradas para la región de Antofagasta.

Tabla 6-20: Principales rutas Región del Biobío y ciudad de Chillán, su longitud y sectores que conecta.

Ruta	Longitud (Km)	Sectores que conecta
N-14-O	9,1	Dichato, Tomé
N-48-O	69,3	Ruta 5 (Bulnes), Quillón, Ruta 146
N-59-Q	103,0	Chillán, Pueblo Seco, Pemuco, Yungay, Huepil, Tucapel, Canteras
P-20	47,6	Ruta 160 (Carampangue), Arauco, Llico, Punta Lavapie
P-40	56,3	Ruta P-20, Lebu
P-60-R	62,9	Ruta 160 (Cerro Alto), Cañete, Ruta P-72-S (Col. Paleco), Contulmo, Región Araucanía
P-72-S	79,4	Ruta P-60-R (Col. Paleco), Quidico, Tirúa, Región Araucanía
Q-34	36,2	Laja, Ruta 180
Q-45	79,2	Los Ángeles, Ruta N-59-Q (Canteras), Laguna de La Laja
Q-61	92,8	Los Ángeles, Santa Bárbara, Alto Biobío
Q-90	35,6	Ruta 5 (Las Tejas), Laja
Q-97-N	38,6	Ruta 5 (Cabrero), Campanario, Cholguan, Ruta N-59-Q (Yungay)
5	157,0	Chillán, Bulnes, Cabrero, El Arrayán, Mulchén, Región Araucanía (La Invernada)
126-S	37,8	Coelemu, Rafael, Tomé
146	72,8	Concepción, Ruta 148, Ruta 5 (Cabrero)
150 (T1)	7,0	Concepción, Ruta 152 (Penco)
150 (T2)	7,8	Penco, Lirquén, Bifurcación
150 (T3 al Norte)	8,3	Bifurcación, Tomé
150 (T3 al Sur)	7,7	Tomé, Bifurcación
152	75,0	Ruta 150 (Penco), Ruta 5 (Mirador)
154	5,4	Ruta 150, Ruta 146, Concepción
156	109,0	Concepción, Santa Juana, Nacimiento, Coihue
158	13,7	Ruta 152, Ruta 126 (Rafael)
160	138,0	Concepción, Coronel, Lota, Ruta P20 (Carampangue), Curanilahue, Ruta P-60-R (Cerro Alto), Los Álamos, Pehuén, Lebu
177	17,2	Ruta 5, Los Ángeles, Ruta 5 (Santa Inés)
178	3,7	Ruta 5 (El Arrayán), Los Ángeles
180	32,6	Ruta 5 (El Arrayán), Ruta 156 (Coihue), Región Araucanía (Renaico)

Fuente: Elaboración Propia.

Los trazados de las rutas consideradas se muestran en la Figura 6-17, en donde se evidencia la importancia de las ciudades de Concepción, Chillán y Los Ángeles, al ser zonas de conexión de la mayoría de las rutas.

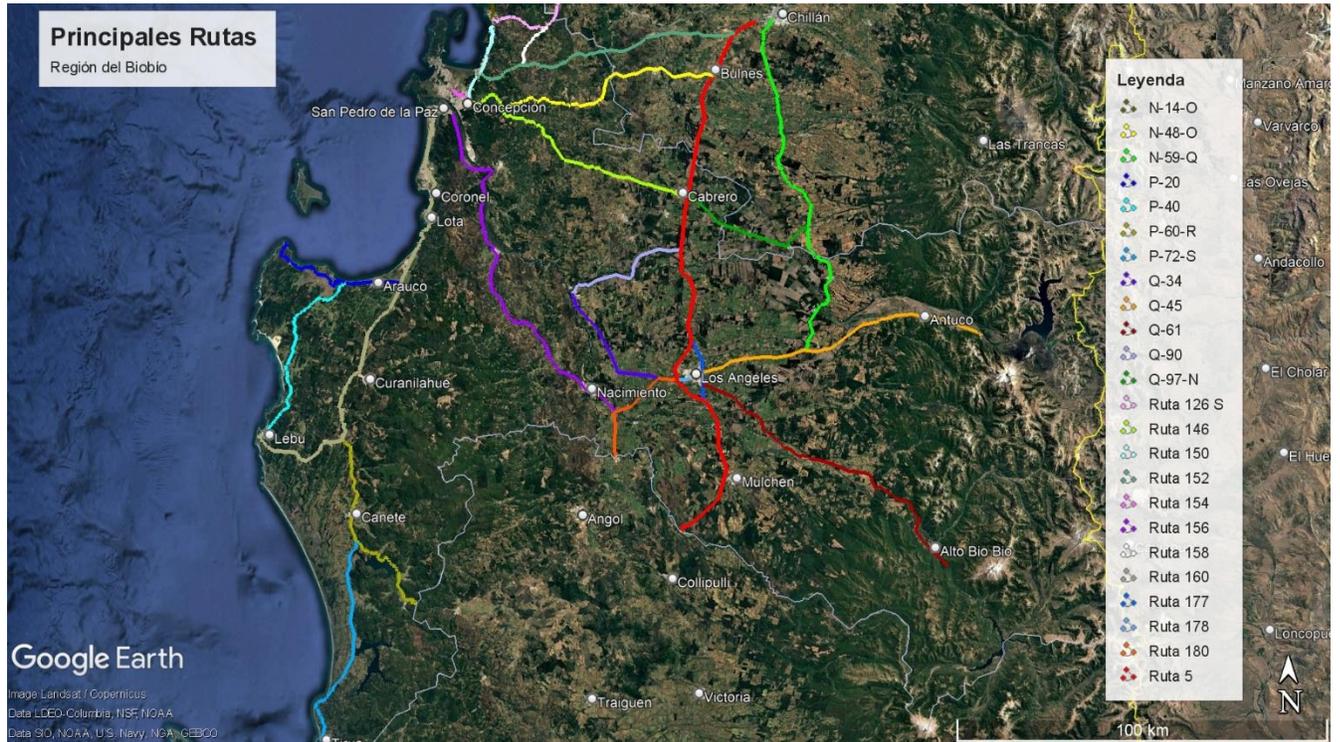


Figura 6-17: Principales rutas región del Biobío.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Los perfiles de elevación asociados a las principales rutas de la región del Biobío se muestran en el Anexo 9.5.2.

6.3.5 Catastro de Estaciones de Servicio

La región de Antofagasta cuenta con un total de 42 estaciones de servicio que suministran bencina y diésel, de las cuales 22 se encuentran dentro de la ciudad de Antofagasta, 10 en la ciudad de Calama y 4 de ellas a lo largo del trazado de la Ruta 5 en la región. La ubicación específica de ellas se muestra en la Figura 6-18.

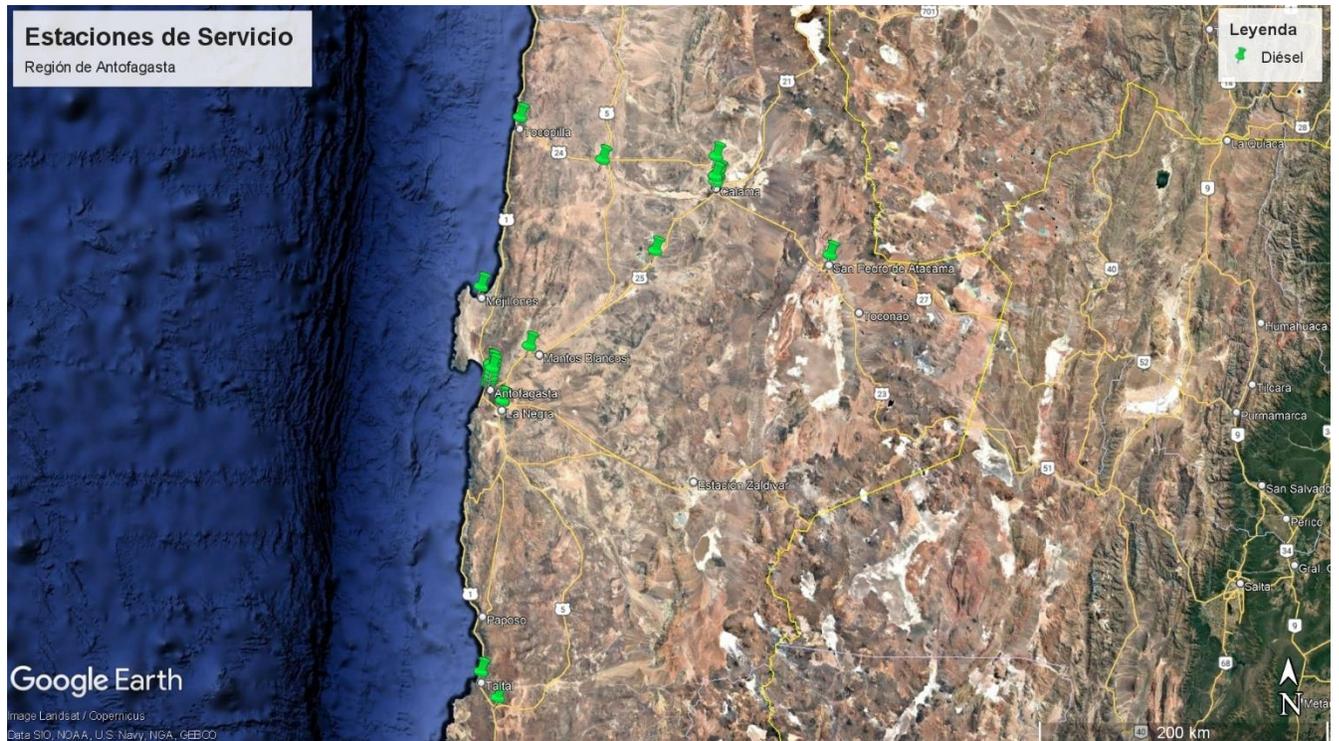


Figura 6-18: Ubicación estaciones de servicio que suministran bencina y diésel en la región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth e información de preciobencina.cl.

En el caso de las estaciones de carga de vehículos eléctricos, en la región de Antofagasta existen 13, de las cuales 6 de ellas se ubican en la ciudad de Antofagasta, 4 en la ciudad de Calama, una en las localidades de Mejillones y San Pedro de Atacama, y una en contigua al trazado de Ruta 5 en la región. En general, las estaciones de carga de vehículos eléctricos están ubicadas en estaciones de servicio que también abastecen combustibles convencionales y en los estacionamientos de supermercados, centros comerciales y hoteles. La ubicación en detalle de las estaciones de carga de vehículos eléctricos en la región se muestra en la siguiente Figura 6-19.

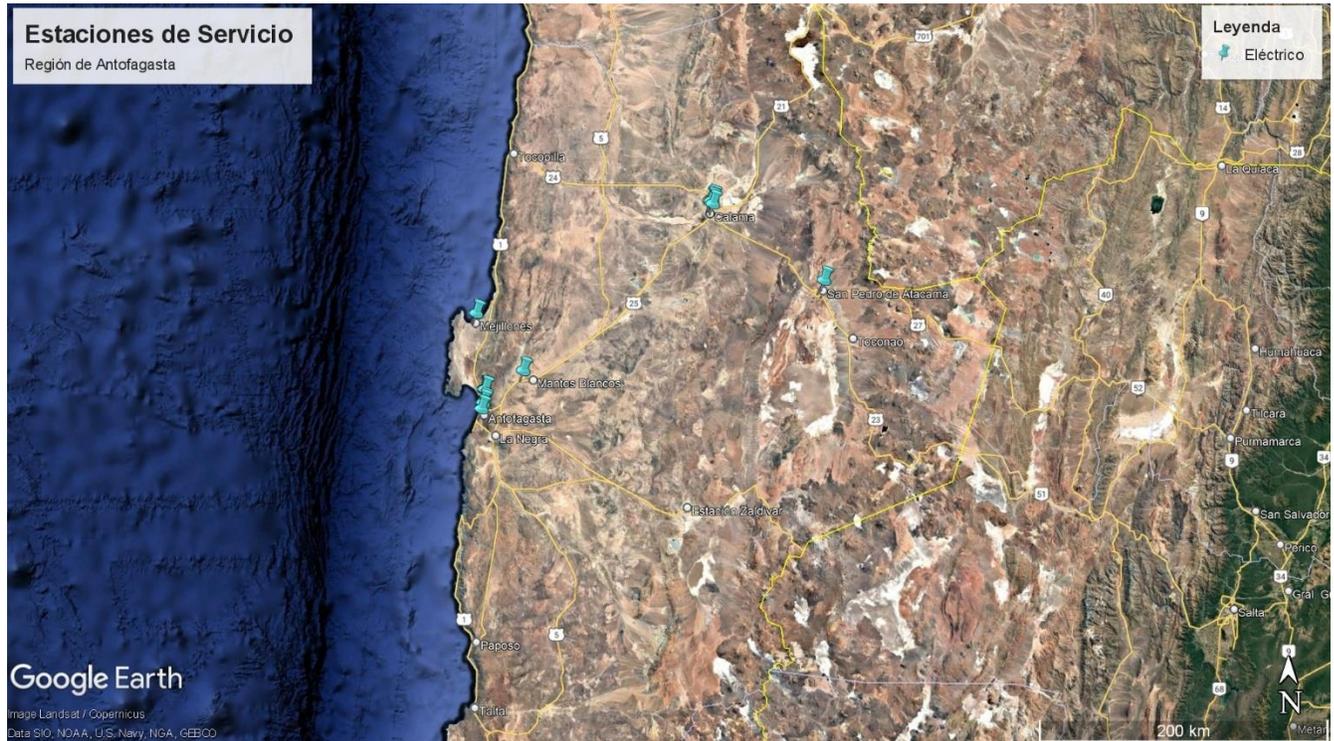


Figura 6-19: Ubicación estaciones de carga de vehículos eléctricos en la región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth e información de la app EcoCarga.

En el caso de la región del Biobío, el abastecimiento de bencinas y diésel es servido por un total de 134 estaciones de servicio, de las cuales 71 se ubican en la conurbación del Gran Concepción y 25 en la comuna de Los Ángeles. La ubicación en detalle de cada una de estas estaciones de servicio se muestra en la Figura 6-20.

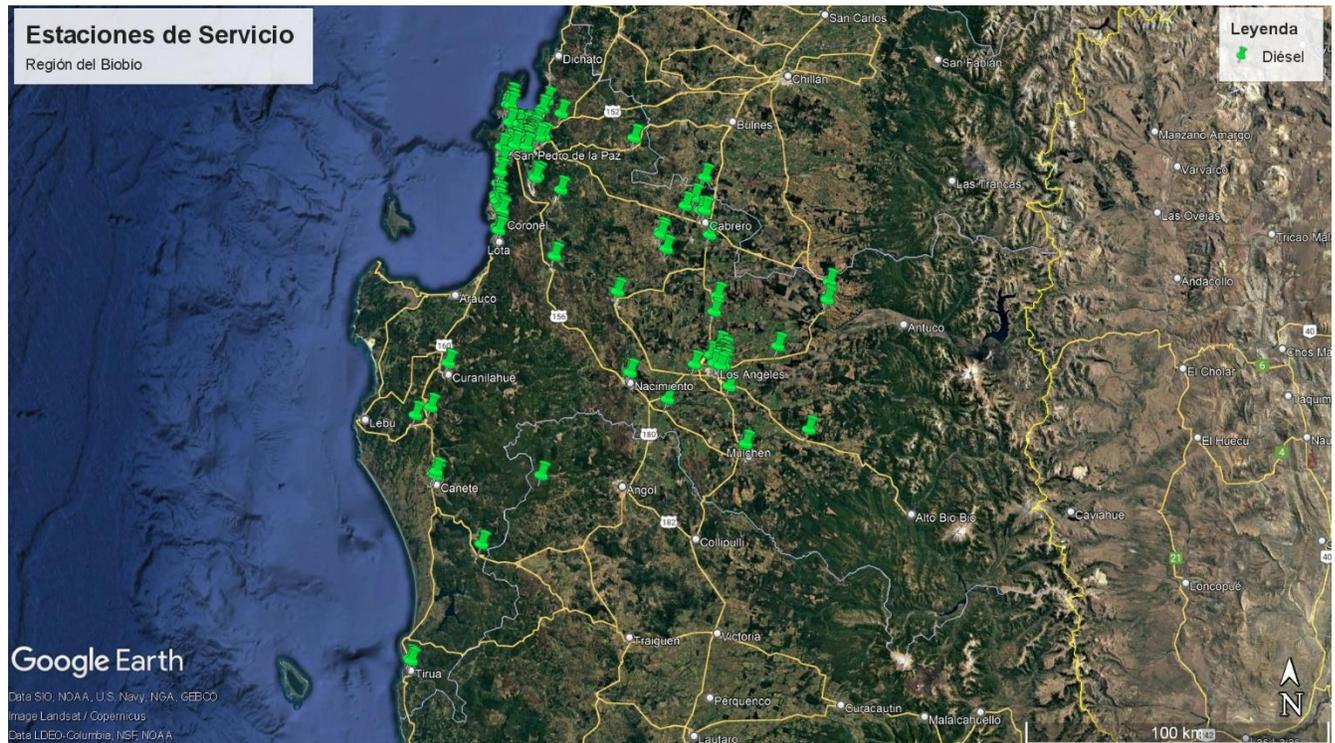


Figura 6-20: Ubicación estaciones de servicio que suministran bencina y diésel en la región del Biobío.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth e información de preciobencina.cl.

Por otro lado, esta región cuenta con un total de 15 estaciones de carga para vehículos eléctricos encontrándose la gran mayoría de ellas en las comunas de Concepción y San Pedro de la Paz, ubicándose un total de 12 estaciones. Del resto, dos estaciones de carga se ubican en el trazado de la Ruta 5 en la región, una al norte y una al sur de la ciudad de Los Ángeles, y la última de ellas en el interior de la ciudad de Los Ángeles. Al igual que en la región de Antofagasta, las estaciones de carga de vehículos eléctricos se encuentran al interior de estaciones de servicio que también abastecen de combustibles convencionales, estacionamientos de supermercados y centros comerciales, y en este caso también en el estacionamiento del Aeropuerto Carriel Sur. La ubicación en detalle de las estaciones de carga de vehículos eléctricos en esta región se muestra en la Figura 6.21.

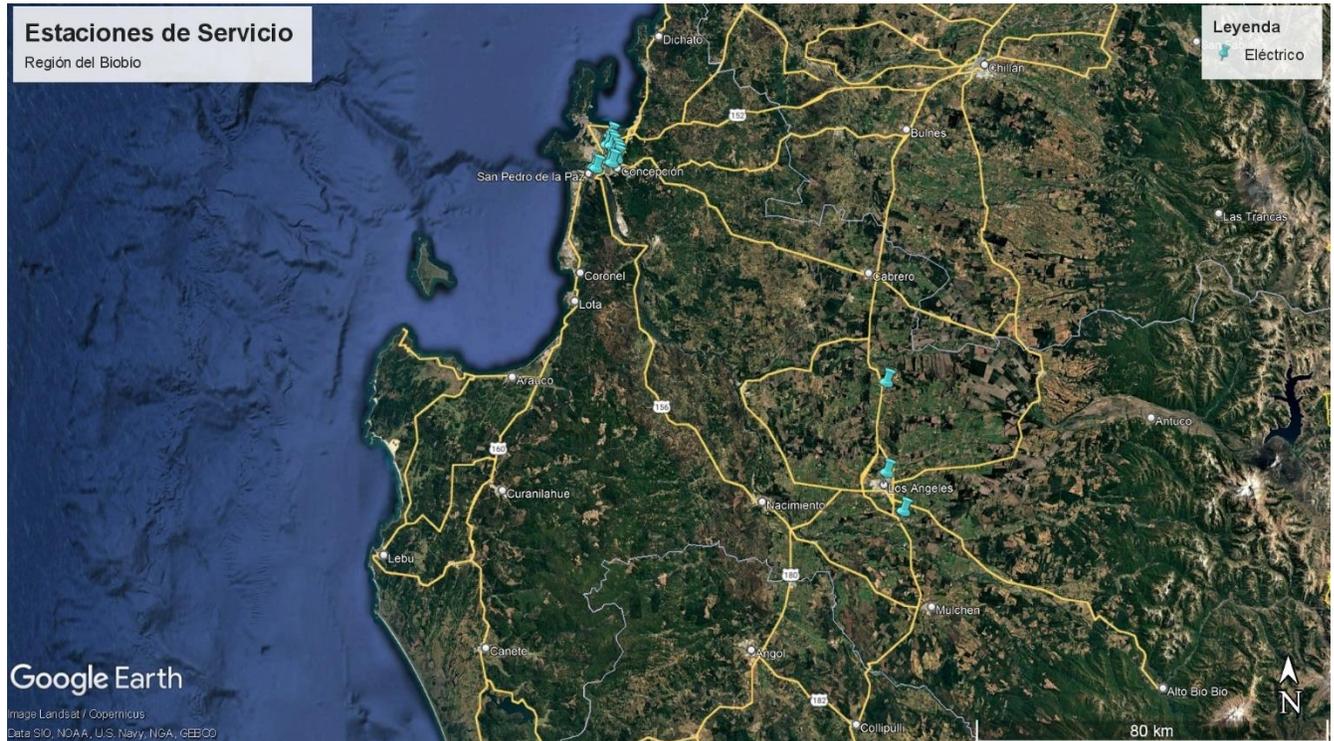


Figura 6-21: Ubicación estaciones de carga de vehículos eléctricos en la región del Biobío.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth e información de la app EcoCarga.

6.3.6 Identificación Principales Actividades Económicas

Las actividades económicas de la región de Antofagasta denotan la vital importancia de la industria minera, siendo responsable de la generación de más de la mitad del Producto Interno Bruto (PIB) de la región. Otras actividades importantes son los servicios financieros y empresariales, y la industria de la construcción, las que aportan algo más del 9% del PIB regional cada una.

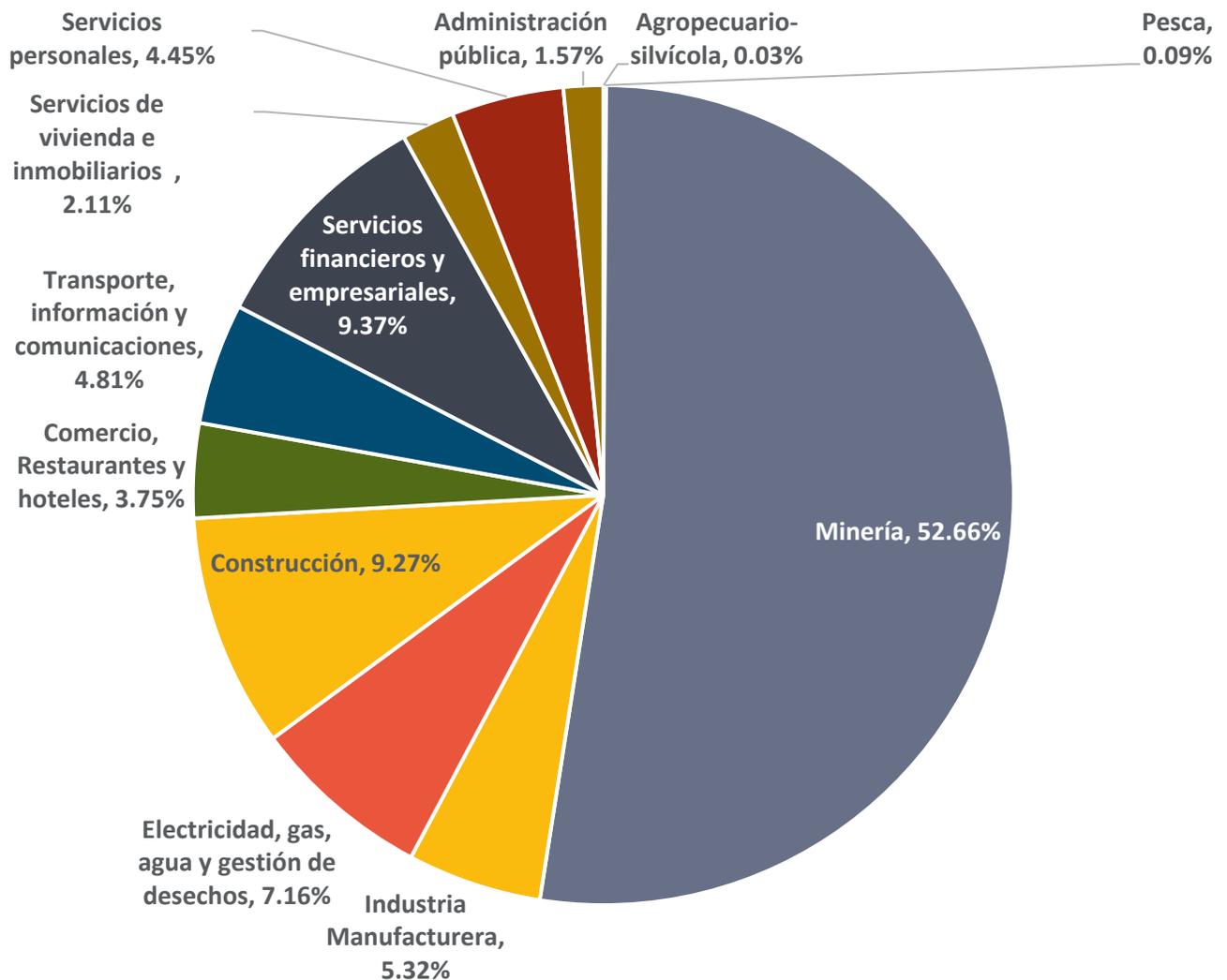


Figura 6-22: Proporción del PIB regional de Antofagasta aportado por cada actividad económica en el año 2019, volumen a precios del año anterior encadenado.

Fuente: Banco Central.

En el caso de la región del Biobío, no existe un sector industrial tan importante como la minería en la región de Antofagasta. Sin embargo, las dos actividades que más aportan al PIB regional son la Industria Manufacturera, que aporta algo más del 20% del PIB, y los Servicios Personales, que aportan cerca del 17%. Otras actividades relevantes son los Servicios Inmobiliarios y de Vivienda; los Servicios Financieros y Empresariales; el Transporte, la Información y las Comunicaciones; la Construcción; y el Comercio, restaurantes y hoteles, que aportan entre el 7 y el 10% del PIB cada uno.

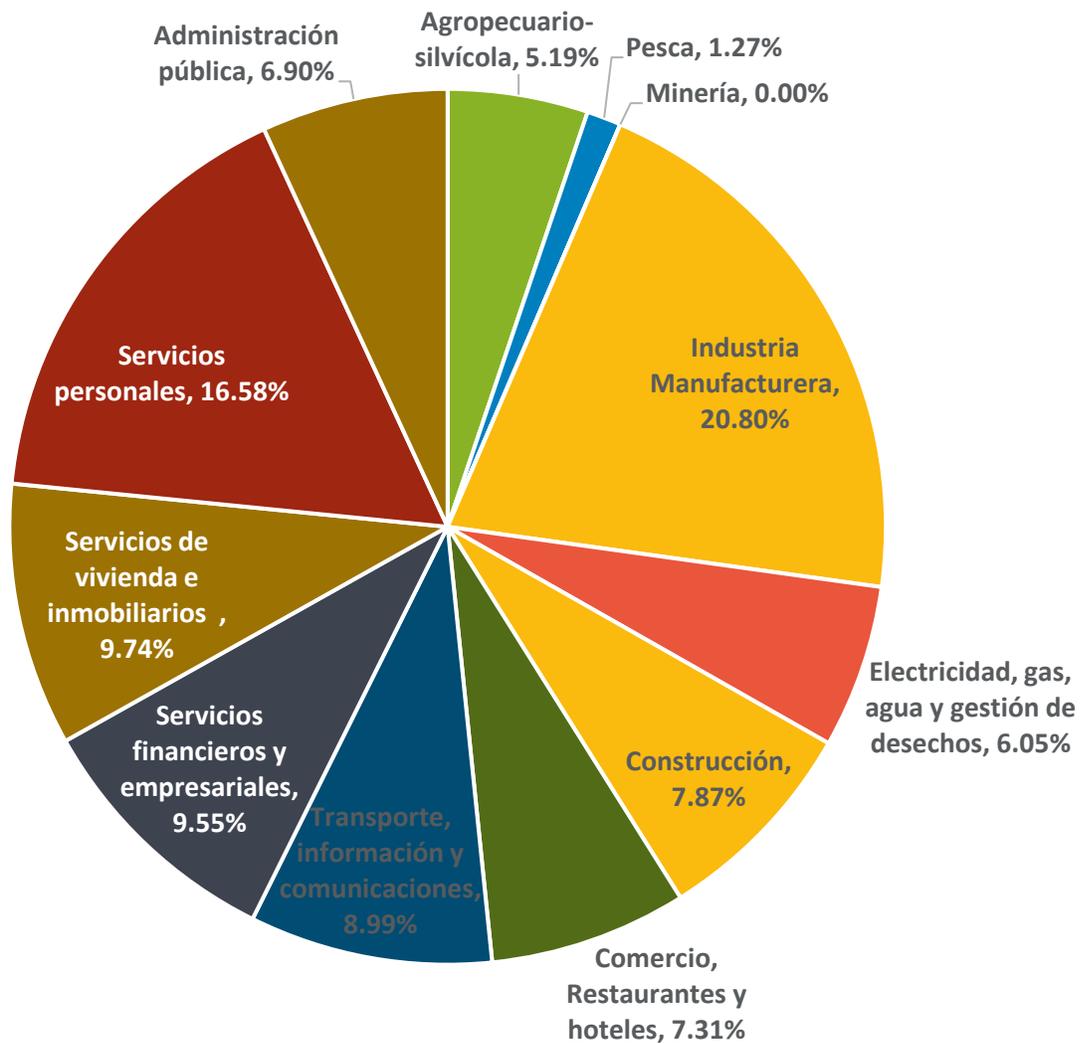


Figura 6-23: Proporción del PIB regional del Biobío aportado por cada actividad económica en el año 2019, volumen a precios del año anterior encadenado..

Fuente: Banco Central.

6.4 Metodología de Simulación de Consumo Energético.

A continuación, se describe la metodología empleada para el cálculo del consumo de energía o combustible en camiones de carga y buses, con el objetivo de comparar el desempeño de los vehículos impulsados por hidrógeno frente a los convencionales con motores diésel. El análisis se basa en un modelo matemático que considera múltiples factores que influyen en el consumo energético, como la aerodinámica, la resistencia a la rodadura, la eficiencia del tren motriz, la conversión de energía y el aprovechamiento del freno regenerativo en el caso de los vehículos eléctricos.

Para realizar una evaluación realista, la metodología se aplicará a rutas obtenidas mediante un seguimiento real por GPS de vehículos de transporte pesado, lo que permite modelar condiciones operativas específicas. El cálculo se realiza evaluando tramo a tramo las condiciones de operación del vehículo.

A continuación, se listan los datos, variables y parámetros del modelo.

Tabla 6-21: Datos, Parámetros y variables del modelo de consumo energético.

Tipo	Identificador	Descripción
Dato	h	Altura de la posición del vehículo.
	\vec{d}	Vector distancia del vehículo.
	α	Angulo de inclinación de la pendiente del vehículo.
	\vec{v}	Vector de velocidad del vehículo.
	t	Marca de tiempo de la medición.
	T	Temperatura del aire
	\vec{w}	Vector velocidad del aire
	m	Masa del vehículo
Parámetro	A	Área frontal del vehículo
	C_D	Coefficiente de arrastre del vehículo
	c	Coefficiente de resistencia a la rodadura
	δ	Factor de inercia rotacional
	$\eta_{transmission}$	Rendimiento de la transmisión
	η_{motor}	Rendimiento de conversión energética del motor
	PCI_{diesel}	Poder calorífico inferior del diesel
	P_{FC}	Potencia máxima suministrable por la Fuel Cell
	η_{Reg-FC}	Rendimiento de transformación de electricidad desde la Fuel Cell
	$\eta_{Reg-Desc}$	Rendimiento de transformación de electricidad desde la Batería
	η_{FC}	Factor de conversión de energía de la Fuel Cell
	η_{freno}	Rendimiento del freno regenerativo
	$\eta_{motor-gen}$	Rendimiento del motor actuando como generador
Variable	$\eta_{Reg-Carga}$	Rendimiento carga de la batería
	$F_{traccion}$	Fuerza de tracción aplicada por el motor
	F_{wind}	Fuerza de arrastre del viento
	F_{roll}	Resistencia a la rodadura
	F_{gx}	Proyección de la fuerza de gravedad sobre la dirección del camino
	ρ_{air}	Densidad del aire
	$\Delta E_{traccion}$	Trabajo realizado por el motor
	ΔE_k	Energía cinética del vehículo
	ΔE_p	Energía potencial del vehículo
	ΔE_{wind}	Trabajo realizado por la fuerza de arrastre del viento
	ΔE_{roll}	Trabajo realizado por la resistencia a la rodadura
E_{motor}	Energía entregada por el motor	

Tipo	Identificador	Descripción
	P_{motor}	Potencia entregada por el motor
	E_{diesel}	Energía entregada por el Diesel
	Q_{diesel}	Consumo de Diesel
	$E_{electrica}$	Energía eléctrica consumida por el motor
	ϵ	Fracción de la demanda eléctrica suplica por la FuelCell
	E_{FC}	Energía eléctrica suministrada por la FuelCell
	E_{bat}	Energía eléctrica suministrada por la batería
	Q_{FC}	Consumo de energía eléctrica de la FuelCell
	E_{recup}	Energía recuperada por el freno regenerativo

Fuente: Elaboración Propia

6.4.1 Modelo Físico del Vehículo en Movimiento

El cálculo considera la simplificación de movimiento longitudinal [86], es decir, considera que el vehículo se traslada a lo largo de una ruta unidimensional cuya altura es variable.

El vehículo es modelado como un elemento puntual en donde las fuerzas internas y externas son aplicadas directamente en el centro de masa. Por su parte, el camino es modelado como una trayectoria bidimensional que posee una distancia medida desde el punto de partida y una altura.

En esta situación es posible identificar cinco fuerzas actuando en el vehículo: La fuerza de gravedad \vec{F}_g , que apunta en dirección al centro de la Tierra; La fuerza normal \vec{F}_N , que es aplicada por el suelo en dirección perpendicular a la dirección del camino; La fuerza de arrastre \vec{F}_{wind} , que es aplicada por el aire de forma paralela a la dirección del camino; La fuerza de resistencia a la rodadura \vec{F}_{roll} , que es aplicada por el suelo en forma paralela a la dirección del camino; Y, por último, la fuerza de tracción \vec{F}_{Tr} , que es aplicada internamente por el sistema de transmisión e impulsa al vehículo en la dirección del camino. Estas fuerzas se muestran aplicadas en el siguiente diagrama de cuerpo libre, en donde se ha designado como α al ángulo de inclinación del camino con respecto a la horizontal en el punto en que se encuentra el vehículo.

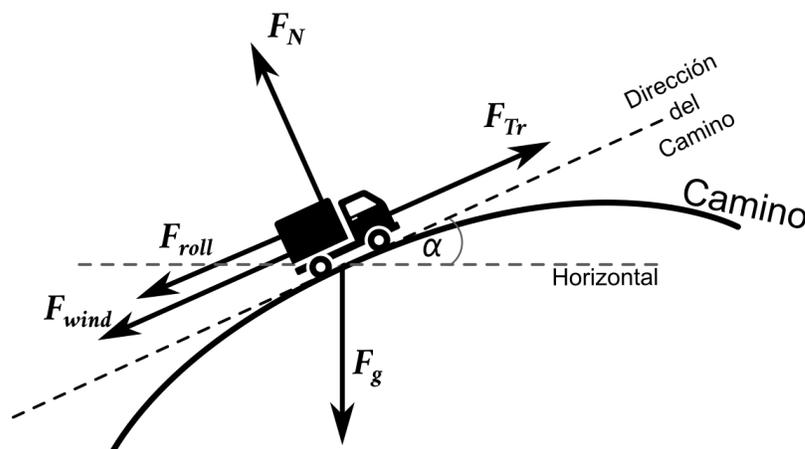


Figura 6-24: Diagrama de cuerpo libre: Fuerzas actuando en el vehículo.

Fuente: Elaboración propia basado en [87]

La fuerza de gravedad \vec{F}_g puede ser descompuesta en dos fuerzas, una perpendicular y otra paralela al camino, denominadas \vec{F}_{gy} y \vec{F}_{gx} , respectivamente. La descomposición de estas fuerzas se realiza gráficamente tal como muestra en la siguiente figura:

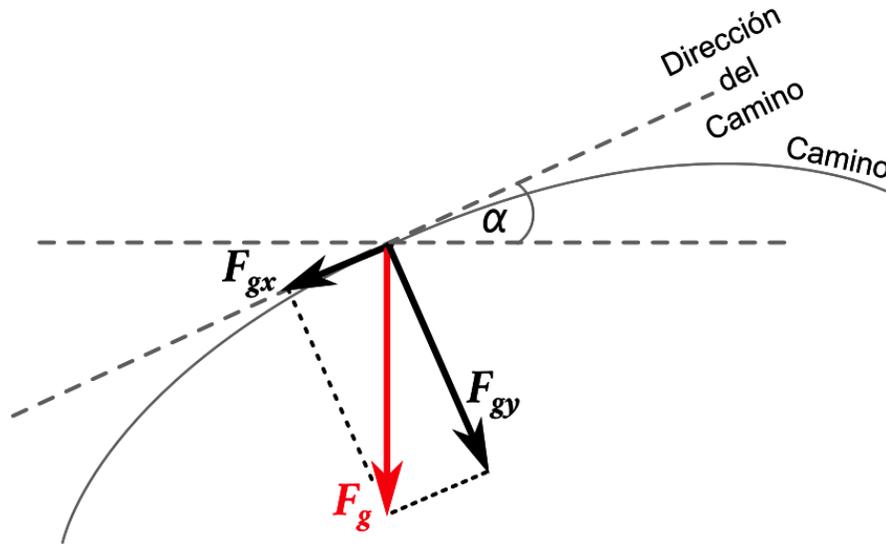


Figura 6-25: Descomposición vectorial de la fuerza de gravedad.

Fuente: Elaboración propia

Al realizar la sumatoria de fuerzas en la dirección del camino y aplicando la segunda Ley de Newton se obtiene la ecuación de movimiento del vehículo, la cual se presenta a continuación.

$$M \cdot \frac{dv}{dt} = F_{traccion} - F_{wind} - F_{roll} - F_{gx} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

M : Masa equivalente del vehículo (kg).

v : Velocidad del vehículo (m/s).

t : Tiempo (s).

$F_{traccion}$: Fuerza que aplica el sistema de transmisión en las ruedas para desplazar al vehículo (N).

F_{wind} : Fuerza de arrastre del viento en el vehículo (N).

F_{roll} : Fuerza de resistencia a la rodadura (N).

F_{gx} : Componente del peso del vehículo en la dirección del camino (N).

Para considerar el efecto de la inercia rotacional de los componentes rotatorios del vehículo se considera que la masa equivalente de este, para efectos de la aceleración, es $M = \delta \cdot m$ [86]. Siendo m la masa del vehículo y δ

un valor comprendido entre 1,08 y 1,1 [87] que considera la inercia de las partes rotatorias del vehículo (ruedas, ejes, etc).

A continuación, se presenta un detalle del cálculo de cada una de las fuerzas implicadas en la dinámica del vehículo.

6.4.1.1 Fuerza del Arrastre del Viento.

La fuerza de arrastre (o resistencia aerodinámica) es la fuerza que, en principio, se opone al movimiento del vehículo a través del aire. Esta resistencia es causada por la interacción entre la superficie del vehículo y el flujo de aire circundante. La magnitud de esta fuerza depende de varios factores, incluyendo la velocidad del vehículo, la densidad del aire, el coeficiente de arrastre aerodinámico y el área frontal del vehículo. Matemáticamente, se expresa como:

$$F_{wind} = -\rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \frac{(v - w)^2}{2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Sin embargo, el módulo de las velocidades será, por definición, siempre positivo, por lo que para detectar si los vectores apuntan en la misma dirección o en direcciones opuestas se utiliza la función signo (sign) y el producto punto entre los vectores, el cual arrojará un valor positivo si ambos poseen el mismo sentido y negativo si ambos apuntan en sentidos opuestos. Con esta modificación la expresión para el cálculo del F_{wind} resulta:

$$F_{wind} = -\text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{w}_x) \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \frac{\|\vec{v} - \text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{w}_x) \cdot \vec{w}_x\|^2}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

ρ_{air} : Densidad del aire circundante al vehículo (kg/m^3).

C_D : Coeficiente de arrastre que depende de la forma del vehículo (-).

A : Área frontal del vehículo (m^2).

\vec{v} : Velocidad del vehículo (m/s).

\vec{w}_x : Proyección de la velocidad del aire en la dirección de la velocidad del vehículo (m/s).

Los valores para A y C_D dependen únicamente de las características del vehículo. Por su parte, la velocidad del viento dependerá del perfil de viento de la ruta a evaluar. Por último, la densidad del aire es una variable que se calcula teniendo en cuenta las variables de temperatura y presión a lo largo de la ruta. La temperatura se obtiene del perfil de temperaturas del lugar, mientras que la presión se calcula según la altitud del lugar a través de la fórmula barométrica, la cual es válida hasta una altitud de 11.000 m.s.n.m. [88]:

$$P(H) = P_0 \cdot \left[\frac{T_0 + L_b \cdot H}{T_0} \right]^{\frac{-g_0 \cdot M_{me}}{R \cdot L_0}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$P(H)$: Presión del aire a una altura H (Pa).

P_0 : Presión atmosférica de referencia (101.325 (Pa)).

T_0 : Temperatura de referencia¹⁰ (288,15 (K)).

L_0 : Tasa de caída de temperatura (-0,0065 (K/m)).

R^* : Constante de los gases ideales (8,3144598 (J/mol.K)).

g_0 : Aceleración de gravedad en la Tierra (9,807 (m/s²)).

M_{me} : Masa molar del aire (0,0289644 (kg/mol)).

Por último, la densidad ρ_{air} en unidades de kg/m³, como función de la presión P (en (kPa)) y la temperatura T (en (°C)), se mediante la siguiente expresión [88]:

$$\rho_{air}(P, T) = \frac{P}{0,2869 \cdot (T + 273,15)} \quad \text{Ecuación 9}$$

6.4.1.2 Fuerza de Gravedad

La fuerza de gravedad es la fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre los cuerpos con masa que se encuentran en su superficie. Esta fuerza siempre apunta hacia el centro de la Tierra y cuando un cuerpo se encuentra sobre un plano inclinado, se puede descomponer en dos direcciones, una perpendicular al plano y otra paralela al mismo. La descomposición vectorial se presenta en la Figura 6-25 y sus componentes se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$F_{gx} = m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$F_{gy} = m \cdot g \cdot \text{cos}(\alpha) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

α : ángulo de pendiente del camino del vehículo (rad).

m : Masa del vehículo (kg).

g : aceleración de gravedad terrestre (9,807(m/s²))

Cabe destacar que la fuerza F_{gy} tiene la misma magnitud que la fuerza normal F_N , pero actúa en sentido contrario debido a la tercera ley de Newton.

6.4.1.3 Resistencia a la Rodadura

La resistencia a la rodadura es una fuerza que ejerce el suelo sobre las ruedas y se debe a la deformación de ésta. Como el vehículo se apoya sobre una superficie y no sobre un único punto, se genera una distribución no homogénea de fuerzas en la superficie de contacto, la cual desplaza el punto de aplicación de la fuerza normal, tal como se muestra en la Figura 6-26 provocando una reacción en la dirección del camino, llamada resistencia a

¹⁰ La temperatura de referencia T_0 corresponde a una temperatura normalizada medida al nivel del mar del modelo de la atmósfera terrestre de la NASA [88] y se utiliza para calcular la presión en función de la altitud junto con la tasa de caída de temperatura L_0 . No se corresponde necesariamente con la temperatura medida con las estaciones meteorológicas.

la rodadura F_{roll} , que se opone al movimiento del vehículo. Esta fuerza es modelada como un valor proporcional a la fuerza normal F_N , tal como se presenta a continuación:

$$F_{roll} = c \cdot F_N = c \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

c : Coeficiente de resistencia a la rodadura (-)

El valor de c depende de múltiples factores, sin embargo, tiene una fuerte dependencia con material de la rueda y el material del suelo por donde se transite. A continuación, se presenta una tabla con rangos de valores para este coeficiente:

Tabla 6-22: Valores típicos para el coeficiente de rodadura.

Condición	c
Ruedas de acero de ferrocarril sobre rieles de acero	0,001 – 0,002
Rieles de tranvía sucios.	0,005
Neumático de camión sobre asfalto	0,006 – 0,01
Neumáticos de coche ordinarios sobre concreto, asfalto nuevo y adoquines pequeños nuevos	0,01 – 0,015
Neumáticos de coche sobre alquitrán o asfalto.	0,02
Neumático de coche sobre arena suelta.	0,2 – 0,4

Fuente: Elaboración Propia basado en [89]

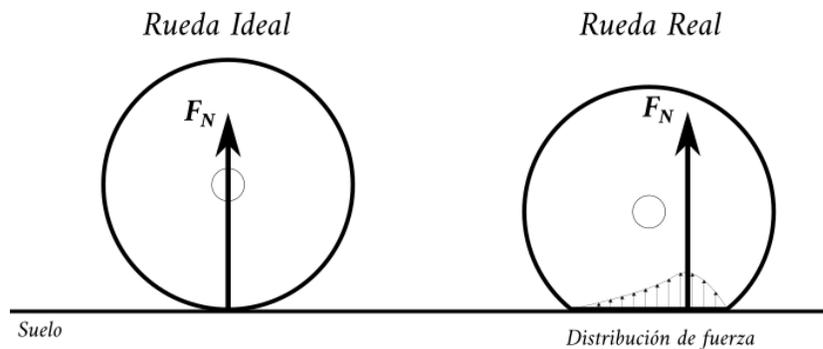


Figura 6-26: Comparativa de fuerzas aplicadas en una rueda ideal y una real.

Fuente: Elaboración propia

6.4.2 Trabajo y Energía

A continuación, se define el método de cálculo del trabajo realizado por las fuerzas y la energía cinética del vehículo. En primer lugar, el trabajo W_{1-2} que realiza una fuerza \vec{F} a un cuerpo a lo largo de una trayectoria descrita por un conjunto de desplazamientos infinitesimales $d\vec{r}$ se calcula como a lo largo de una trayectoria con inicio r_1 y fin r_2 , se calcula con la siguiente expresión:

$$W_{1-2} = \int_{x_1}^{x_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad \text{Ecuación 13}$$

En el caso de este modelo, tanto la fuerza como los desplazamientos se encuentran en la misma dirección, por lo que la integral se simplifica mediante:

$$W_{1-2} = \int_{x_1}^{x_2} F dx \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

x_1 : Posición de inicio del movimiento (m)

x_2 : Posición final del movimiento (m)

x : Variable de posición (m)

Por último, se integra la Ecuación 5, obteniendo:

$$\Delta E_k = \Delta E_{traccion} - \Delta E_p - \Delta E_{wind} - \Delta E_{roll} \quad \text{Ecuación 15}$$

O reordenando:

$$\Delta E_{traccion} = \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta E_{wind} + \Delta E_{roll} \quad \text{Ecuación 16}$$

Si $\Delta E_{traccion} \geq 0$: implica una demanda de energía por parte del vehículo.

Si $\Delta E_{traccion} < 0$: implica que el vehículo utilizó el freno.

El desarrollo de las expresiones directas de cada uno de estos términos se encuentra en el Anexo, en la sección 9.3. A continuación, se presentan las expresiones utilizadas para el cálculo de cada uno de los términos:

$$\Delta E_k = M \cdot \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot \Delta h \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\Delta E_{wind} = \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \Delta x}{2} \cdot \left(\frac{v_2 + v_1}{2} \pm w_x \right)^2 \quad \begin{cases} + \text{ si } \vec{v} \cdot \vec{w}_x < 0 \\ - \text{ si } \vec{v} \cdot \vec{w}_x \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\Delta E_{roll} = c \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \Delta x \quad \text{Ecuación 20}$$

6.4.3 Cálculo del Consumo

En primer lugar, independientemente del tipo de combustible que utilice un vehículo, se calcula $E_{traccion}$ para cada uno, en cada una de las rutas a evaluar, con las condiciones meteorológicas designadas, a través de las

ecuaciones presentadas anteriormente. Con este valor calculado, se conoce el requisito energético bruto de cada vehículo en particular en cada una de las rutas.

Luego, se utilizan los rendimientos de las distintas partes del vehículo para calcular el consumo neto de combustible requerido.

A continuación, se presenta la metodología de cálculo del consumo de combustible para cada tipo de vehículo.

6.4.3.1 Vehículo Diésel

La Figura 6-27 muestra un modelo simplificado de un vehículo a Diésel. Mediante este esquema se calcula el consumo de combustible en los distintos intervalos.

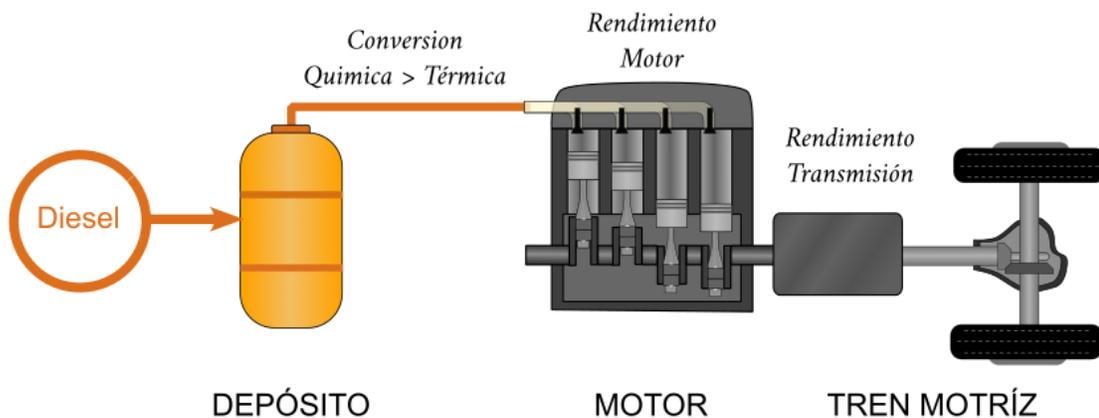


Figura 6-27: Modelo de un vehículo Diésel

Fuente: Elaboración propia

Dado que la energía requerida para desplazar el vehículo es $E_{tracción}$ y el sistema de transmisión tiene un rendimiento $\eta_{transmisión}$, la energía que debe suministrar el motor se calcula con la Ecuación 21. Este rendimiento depende principalmente de la configuración y construcción y, en menor medida, de las condiciones de operación, por lo que se considera como un valor fijo obtenido a partir de bibliografía especializada.

$$E_{motor} = \frac{E_{tracción}}{\eta_{transmisión}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Siempre que $E_{tracción} \geq 0$.

En el caso contrario, significa que el vehículo se está frenando, por lo que el motor no suministra energía.

Por otro lado, la potencia instantánea suministrada por el motor se calcula como:

$$P_{motor} = \frac{E_{motor}}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo entre dos mediciones.

Cabe destacar que para efectos de cálculo se utilizó una versión alternativa de esta definición, pues en ciertas circunstancias la energía (E_{motor}) presentaba una alta variabilidad en cortos periodos, sobre todo en los recorridos con un mayor muestreo. Para evitar el ruido que provoca esta variabilidad se amplió el rango de mediciones utilizadas para calcular la potencia instantánea, es decir, que para calcular P_{motor} en el instante i , lo que llamaremos P_{suave_i} , se utilizarán las n mediciones de energía y tiempo anteriores al instante i de modo que la medición contemple al menos 300 segundos. De este modo, la potencia instantánea calculada, llamada “Potencia suave” en la planilla, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{suave_i} = \sum_{k=i-n}^i \frac{E_{motor_k}}{\Delta t_k} \quad \text{Ecuación 23}$$

Los motores de combustión no son capaces de aprovechar toda la energía química que poseen, por lo que la energía total que ingresa al motor se puede calcular a través del rendimiento del motor η_{motor} con la Ecuación 24. El rendimiento del motor típicamente varía dependiendo del tipo de vehículo por lo que se ha diferenciado entre buses y camiones, este valor se obtiene a partir de bibliografía.

$$E_{diesel} = \frac{E_{motor}}{\eta_{motor}} \quad \text{Ecuación 24}$$

Por último, el consumo de Diesel (Q_{diesel}) se calcula como la cantidad de combustible que es capaz de suministrar la energía E_{diesel} , es decir, el poder calorífico inferior (PCI_{diesel}). Por lo tanto, el consumo se puede calcular como:

$$Q_{diesel} = \frac{E_{diesel}}{PCI_{diesel}} \quad \text{Ecuación 25}$$

6.4.3.2 Vehículo con Fuel Cell

La Figura 6-28 muestra un modelo simplificado del funcionamiento de un vehículo con celda de combustible. Mediante este esquema se calcula el consumo de combustible en los distintos intervalos.

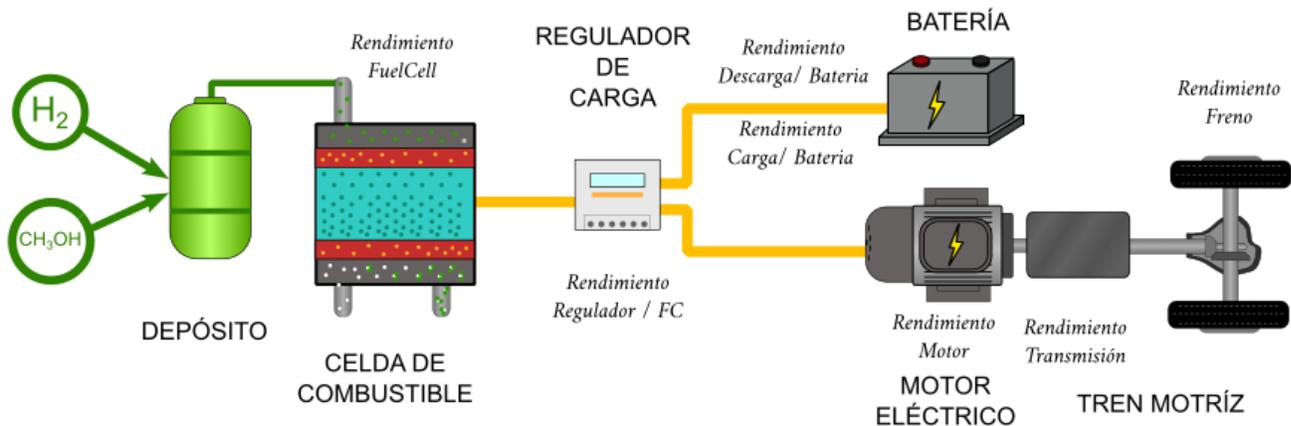


Figura 6-28: Modelo de un vehículo con celda de combustible

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso del vehículo a Diesel, la energía requerida para desplazar el vehículo es $E_{tracción}$ y el sistema de transmisión tiene un rendimiento $\eta_{transmisión}$, por lo que la energía que debe suministrar el motor se calcula mediante la Ecuación 26. Este rendimiento suele ser superior al encontrado en motores Diesel pues los motores eléctricos dependen de menos componentes para transmitir la potencia desde el motor al eje de las ruedas. El valor de este rendimiento se considera como un valor fijo obtenido a partir de bibliografía.

$$E_{motor} = \frac{E_{tracción}}{\eta_{transmisión}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Siempre que $E_{tracción} \geq 0$. En el caso contrario, significa que el vehículo se está frenando, por lo que el motor no suministra energía. Y se activa el freno regenerativo, cuyo cálculo se presenta más adelante.

Por otro lado, la potencia instantánea suministrada por el motor se calcula como:

$$P_{motor} = \frac{E_{motor}}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo entre dos mediciones.

En este caso se utiliza el mismo concepto y ecuación de “Potencia suave” definida para el caso de los vehículos a diésel.

Los motores eléctricos no son capaces de aprovechar toda la energía eléctrica que poseen, por lo que la energía total que ingresa al motor se puede calcular a través del rendimiento del motor η_{motor} con la Ecuación 28. Dado que los fabricantes no suelen indicar el rendimiento específico del motor del vehículo en las fichas técnicas, el valor de este rendimiento se obtiene mediante bibliografía especializada.

$$E_{eléctrica} = \frac{E_{motor}}{\eta_{motor}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Esta energía eléctrica puede provenir desde la Fuel Cell o desde la batería según la potencia que requiera el motor. En general, la energía vendría desde la celda de combustible, sin embargo, este componente puede suministrar una potencia máxima denominada P_{FC} . Si se requiere más potencia, el restante se toma desde la batería. De este modo, se puede calcular el factor de cobertura ϵ , correspondiente a la fracción de la energía que proporciona la Fuel Cell mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \max\left(1; \frac{P_{FC}}{P_{motor}}\right) \quad \text{Ecuación 29}$$

Luego, la energía eléctrica suministrada por la FuelCell depende del rendimiento de transformación del regulador de carga η_{Reg-FC} se calcula como:

$$E_{FC} = \epsilon \frac{E_{eléctrica}}{\eta_{Reg-FC}} \quad \text{Ecuación 30}$$

Por su parte, la energía eléctrica suministrada por la batería E_{Bat} depende del rendimiento de descarga de la batería $\eta_{Reg-Desc}$ y se calcula mediante:

$$E_{Bat} = (1 - \epsilon) \frac{E_{electrica}}{\eta_{Reg-Desc}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Para conocer el consumo de la Fuel Cell es necesario conocer el rendimiento de la celda misma η_{Reg-FC} , es decir, la relación de conversión entre energía eléctrica de salida y la energía química de entrar y, por otro lado, se requiere el poder calorífico del hidrógeno, es decir, la relación de transformación de una unidad de masa (kilogramos) de hidrógeno a una unidad de energía química (kilowatt-hora), denominado PCI_{H_2} . De este modo, el consumo de hidrógeno se calcula como:

$$Q_{FC} = \frac{E_{FC}}{\eta_{FC} \cdot PCI_{H_2}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Cabe destacar que si bien se ha considerado el rendimiento de la Fuel Cell como un valor fijo, este valor se ve afectado por distintas variables como la presión, la temperatura, el nivel de carga y la vida remanente del componente. El valor considerado para este estudio corresponde a un valor promedio del rendimiento de un conjunto de celdas de un vehículo de carga pesada en condiciones de operación en ruta mixta, con tramos en carretera, ciudad y zonas rurales [90].

Cuando el vehículo utiliza su freno, parte de la energía del frenado es recuperada como energía eléctrica. El vehículo tiene un rendimiento de freno η_{freno} que indica la proporción de energía cinética que es posible recuperar, luego, parte de esa energía se pierde en el sistema de transmisión. Por su parte, el motor posee un rendimiento distinto cuando actúa como generador, el cual llamaremos $\eta_{motor-gen}$. Por último, el regulador de carga tiene un rendimiento de carga de la batería, llamado $\eta_{Reg-Carga}$. Por lo tanto, la energía recuperada debido al freno regenerativo se calcula como:

$$E_{recup} = m \cdot \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) \cdot \eta_{freno} \cdot \eta_{transmision} \cdot \eta_{motor-gen} \cdot \eta_{Reg-Carga} \quad \text{Ecuación 33}$$

6.4.4 Cálculos Preliminares

En esta sección se detalla el tratamiento de los datos de entrada, el cual permite que los datos sean utilizados posteriormente en las ecuaciones que se presentaron a lo largo del capítulo.

En primer lugar, se cuenta con una serie de trayectorias por GPS, tienen un registro de distintos datos referentes al viaje realizado por un vehículo en particular. Los datos utilizados en el modelo son¹¹:

- Marca de tiempo t_i del registro
- Coordenadas UTM¹²: \vec{x}_i
- Velocidad como magnitud escalar: v_i

¹¹ El subíndice i indica el número del registro.

¹² Las coordenadas UTM (o Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator) son un sistema de proyección cartográfica que divide la Tierra en zonas numeradas y letras de zona. Se expresan en metros y se usan para ubicar puntos en mapas topográficos.



Con las coordenadas UTM es posible conseguir las alturas h_i para cada marca de tiempo mediante un mapa topográfico de la zona del trayecto.

Con estos valores es posible calcular el vector distancia para cada tramo, este es:

$$\vec{d} = \begin{pmatrix} \vec{x}_{i+1} \\ h_{i+1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \vec{x}_i \\ h_i \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 34}$$

Por otro lado, el ángulo de inclinación α_i se calcula, según la siguiente expresión:

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{d} \right) \quad \text{Ecuación 35}$$

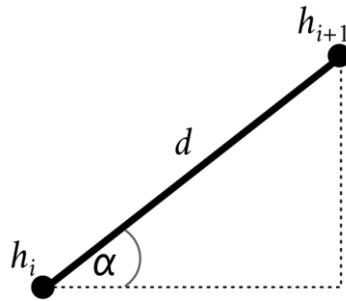


Figura 6-29: Esquema de cálculo de ángulo de inclinación

Fuente: Elaboración propia

Luego, el vector de velocidad del vehículo se construye con la siguiente expresión:

$$\vec{v} = v \cdot \frac{\vec{d}}{\|\vec{d}\|} \quad \text{Ecuación 36}$$

6.4.4.1 Perfil de viento

Se obtiene un vector \vec{w} con la velocidad del viento. Sin embargo, es necesario obtener la proyección de este vector en la dirección de la velocidad del vehículo \vec{w}_x , lo cual se representa esquemáticamente en la Figura 6-30 y se calcula mediante la Ecuación 37.

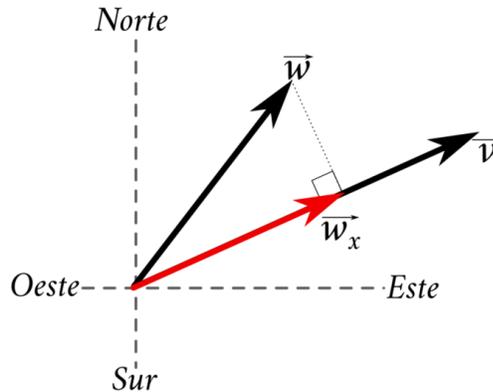


Figura 6-30: Esquema de cálculo de la proyección de la velocidad del viento.

Fuente: Elaboración propia

$$\vec{w}_x = \vec{v} \frac{\vec{w} \cdot \vec{v}}{\|\vec{v}\|^2}$$

Ecuación 37

Esta es la forma del perfil de velocidad que se utiliza en la Ecuación 7.

Dado que el perfil de viento es muy variable en el tiempo, se realizará el siguiente procedimiento para sensibilizar el resultado:

- Se definirán hasta 3 zonas climáticas a lo largo del recorrido.
- De cada una de estas zonas se obtendrá el perfil de vientos en formato de rosa de los vientos de ocho direcciones.
- Para cada una de las ocho direcciones principales (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), se construirá un perfil de viento que apunte en dicha dirección a lo largo de la zona correspondiente y cuya magnitud sea la más alta registrada en esa dirección. De este modo, se podrá tener un amplio rango de condiciones de operación potenciales para el vehículo.
- Se generará un último caso que considerará la condición de viento, tanto en magnitud como dirección, más frecuente por zona climática y se aplicará esta condición a lo largo del trayecto correspondiente a esta zona.
- Con estos 9 perfiles se simula el consumo de energía del vehículo en el trayecto para cada caso. Se considera que el último perfil (más frecuente) se corresponda con el consumo más esperable de combustible, mientras que el resto de perfiles indicarán la variabilidad que este valor pueda tener dada las diversas condiciones de viento que puedan ocurrir en el trayecto. Así, además, se podrá evaluar la condición más desfavorable y más favorable de viento y cuanta incidencia pueda tener en la variación del consumo de combustible.

Este enfoque es necesario debido a que el viento posee una amplia variabilidad en el tiempo, pudiendo presentar ráfagas de segundos y cambios bruscos de dirección, además de cambiar su comportamiento por temporadas y año a año, esto provoca una alta incertidumbre en esta variable inherente al fenómeno del viento, por lo que, más que buscar un valor único representativo del consumo, se busca conocer el impacto que la dirección y magnitud del viento pueden tener en el consumo de combustible.

6.4.4.2 Perfil de Temperaturas

Se evaluarán cinco perfiles de temperatura con el fin de, bajo el mismo concepto anterior, evaluar una situación esperable y sensibilizar el consumo de combustible en función de la variabilidad de temperatura. El caso esperable corresponde al promedio anual de la temperatura por cada zona climática. El resto de casos límites corresponden a, por cada zona climática, la mayor y menor temperatura registrada en periodo de verano y la mayor y menor temperatura registrada en periodo de invierno. La mayor temperatura ocurrirá para trayectos en horario diurno, mientras las temperaturas más bajas ocurrirán probablemente para trayectos nocturnos. Así, estas variaciones de temperatura permitirán cuantificar la incidencia en la variación del consumo de combustible de cada caso.

6.4.5 Parámetros del Modelo

A continuación, se presentan los valores utilizados como parámetros del modelo.

6.4.5.1 Parámetros Generales

Tabla 6-23: Datos y Parámetros del modelo de consumo energético.

Contexto	Descripción	Identificador	Valor	Unidad	Fuente
Camión	Coeficiente de arrastre del vehículo	C_D	0,7035	-	[91]
Bus	Coeficiente de arrastre del vehículo	C_D	0,633	-	[92]
Vehículo	Coeficiente de resistencia a la rodadura	c	0,008	-	[89]
Vehículo	Factor de inercia rotacional	δ	1,08	-	[86]
Vehículo Diesel	Rendimiento de la transmisión	$\eta_{transmission}$	0,85	-	[93]
Vehículo Eléctrico	Rendimiento de la transmisión	$\eta_{transmission}$	0,91	-	[93]
Camión Diesel	Rendimiento de conversión energética del motor	η_{motor}	0,471	-	[94]
Bus Diesel	Rendimiento de conversión energética del motor	η_{motor}	0,461	-	[94]
Vehículo hidrógeno	Rendimiento de conversión energética del motor	η_{motor}	0,91	-	[93]
Vehículo Diesel	Poder calorífico inferior del diésel	PCI_{diesel}	9,937	kWh/l	[95]
Vehículo hidrógeno	Rendimiento de transformación de electricidad desde la Fuel Cell	η_{Reg-FC}	0,567		[90]
Vehículo hidrógeno	Rendimiento de transformación de electricidad desde la Batería	$\eta_{Reg-Desc}$	0,92	-	[93]
Vehículo hidrógeno	Poder calorífico inferior del Hidrógeno	PCI_{H_2}	39,4	kWh/kg	[96]
Vehículo hidrógeno	Rendimiento del freno regenerativo	η_{freno}	0,573	-	[97]
Vehículo hidrógeno	Rendimiento del motor actuando como generador	$\eta_{motor-gen}$	0,91	-	[93]
Vehículo hidrógeno	Rendimiento carga de la batería	$\eta_{Reg-Carga}$	0,9		[93]

Fuente: Elaboración Propia

6.4.5.2 Descripción de los Vehículos

En este capítulo se presentarán los modelos seleccionados para la simulación del caso de estudio.

6.4.5.2.1 Descripción del bus a diésel de referencia.

El bus de referencia para el caso de estudio corresponde a un autobús de dos pisos **Marcopolo Paradiso New G7 1800DD**. Este vehículo está diseñado para transporte interurbano y de larga distancia, con un enfoque en capacidad, eficiencia y seguridad operativa. Este modelo, fabricado por Marcopolo, cuenta con un chasis Scania K 400B 6x2, el cual proporciona un sistema motriz robusto y adaptable a diferentes condiciones de operación.



Figura 6-31: Fotografía del bus de referencia caso de estudio

Fuente: Oyarzo C., P. (2018). [N° 2955 / Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD / Tur-Bus] [Fotografía]. Flickr.
<https://www.flickr.com/photos/busesdelsur /31500309817>

Algunas especificaciones del vehículo son:

- **Dimensiones:** El vehículo en estudio presenta una longitud de 14 m, un ancho de 2,60 m, una altura 4,10 m y una distancia entre ejes de 6,3 m (delantero al primer eje trasero)
- **Capacidad de pasajeros:** La distribución de asientos configurable entre 48 y 64 pasajeros, dependiendo del nivel de equipamiento y la configuración estándar con butacas semi-cama o cama en ambos niveles.
- **Accesibilidad:** Contiene una escalera de acceso a la planta superior con pasamanos ergonómicos y plataforma para personas con movilidad reducida (según configuración).
- **Chasis y sistema motriz:** Presenta un motor Scania DC13 113, 6 cilindros en línea, diésel Euro 5 o Euro 6. Con una potencia máxima de 400 HP a 1.900 rpm y un torque de 2.100 Nm entre 1.000-1.350 rpm. Para la transmisión cuenta con un sistema Scania Opticruise automatizada de 12 velocidades. Su configuración de eje es de tracción 6x2, con tercer eje direccional para mejorar la maniobrabilidad. La suspensión es neumática integral con control electrónico de altura. Finalmente presenta un sistema de frenos de discos en las tres ruedas con ABS y control electrónico de estabilidad (ESP).
- **Autonomía y capacidad de combustible:** Cuenta con una capacidad de estanque de aproximadamente 600 litros y un consumo estimado de 2,5 y 3 km/l, dependiendo del perfil de operación.
- **Climatización y confort:** Presenta sistema de aire acondicionado con control de temperatura independiente por nivel, cortinas y vidrios tintados para reducción térmica y de reflejos e iluminación LED en cabina y compartimiento de pasajeros.
- **Sistemas de seguridad y asistencia:** Tiene control de tracción y asistencia en pendientes, cámaras de monitoreo en puertas y retrovisores electrónicos y salidas de emergencia en ambos niveles con mecanismos de apertura rápida.

El valor de inversión a considerar para la simulación del caso de estudio para este vehículo es de **USD 330.000**. Este valor, según lo indicado en el artículo publicado en RutaMotor (2022), corresponde a la adquisición de unidades del modelo Marcopolo G8 por parte de la misma empresa que proporcionó la información operativa para este análisis. Para efectos de este estudio se han considerado las características técnicas del modelo G7 y

los costos referentes al G8 únicamente por la disponibilidad de la información, esto se justifica debido a que los modelos son técnicamente similares, ya que la diferencia es meramente un cambio de generación. La referencia directa a una compra en el mercado chileno permite tomar este monto como una estimación representativa y del costo de inversión para el vehículo en análisis.

De acuerdo con la información entregada por la empresa Turbus, el servicio Calama - Antofagasta tiene una duración de 3 horas, con un tiempo de descanso de 1 hora y 30 minutos antes de reiniciar la operación. Este recorrido es realizado por un solo conductor y cuenta con una flota operativa de 16 buses. En promedio, cada bus recorre aproximadamente 263,4 kilómetros en un mes, con un consumo estimado de 86.225 litros de combustible.

Por otra parte, la empresa proporcionó información con respecto a la ruta Concepción – Santiago. Por lo que, para los fines de este estudio se ha realizado una adaptación de la información, acortando la ruta en el tramo Concepción – Chillán. Este ajuste permite evaluar la viabilidad de implementar un recorrido en dicha región, considerando las condiciones operativas y de manejo necesarias para cumplir con los requerimientos del análisis.

6.4.5.2.2 Descripción del camión a diésel de referencia.

El vehículo de referencia para el caso se corresponde con el que realiza los trayectos de los casos 3 y 4, descritos posteriormente, el cual es un tractocamión modelo FM de la marca Volvo con acoplamiento de estanque para transporte de combustible, cuyas características principales se exponen en la Tabla 6-24.

Tabla 6-24: Características del vehículo de referencia del Caso 1 de transporte de carga.

Característica	Valor	Unidad
Marca	Volvo	-
Modelo	FM	-
Peso Descargado	14.000	kg
Peso Cargado	44.600	kg
Depósito de combustible para uso propio	490	l

Fuente: Elaboración Propia





Figura 6-32: Fotografías del vehículo y carga de referencia del Caso 1

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la información entregada por la empresa Transcom, en un mes, un vehículo de éstos recorre en promedio 20.824 km, equivalente a aproximadamente 32 viajes, realizando viajes continuos con solo 15 minutos de descanso del vehículo en la llegada al taller, tiempo necesario para el recambio de conductor. En los casos que no exista conductor de relevo, el camión tendrá 12 horas de descanso, equivalente al descanso del conductor del último viaje, sin embargo, es un tiempo de espera que se debe evitar para maximizar la rentabilidad del uso del vehículo.

Mensualmente, la empresa carga aproximadamente 8.095 litros de combustible al vehículo para movilizarse y se estima que el rendimiento promedio del vehículo en el trayecto es de 2,58 km/l.

El valor del modelo de camión Volvo FM Larga Distancia 6x2 es de **USD 150,000** más IVA, según la información proporcionada por Volvo Chile, quien tiene un contrato con Transcom. Si bien se mencionó que el precio obtenido por Transcom es más bajo que el precio de lista, el valor indicado corresponde al precio estándar de venta.

6.4.5.2.3 Resumen de parámetros para vehículos a diésel

A continuación, se presenta una tabla con los valores adoptados para el análisis. En aquellos casos donde se recurrió a valores estimados, su fundamentación se expone en los dos apartados siguientes de este informe. Estos parámetros se sustentan en información proveniente de literatura especializada, especificaciones de fabricantes y antecedentes de proyectos previos. Cabe destacar que constituyen una base inicial para el estudio y podrán ser ajustados en función de nueva información técnica o contextual que se disponga en etapas posteriores.

Tabla 6-25: Parámetros de vehículos a diésel del modelo.

Tipo	Unidad	Bus FCEV	Camión ICEV
Modelos	-	Paradiso New G7 1800DD	Volvo FM
Área frontal	m ²	10,7	6,89
Valor	USD	\$330.000	\$150.000
Recorrido	km/año	140 000	157 680

6.4.5.2.4 Descripción del bus a hidrógeno tipo.

Como modelo representativo de bus a hidrógeno, se seleccionó el **Enviro400FCEV** de la marca Alexander Dennis, una compañía reconocida a nivel mundial con presencia en países como el Reino Unido, Nueva Zelanda, Canadá y Singapur, y con una considerable experiencia en el diseño e implementación de soluciones de transporte sustentable impulsadas por energías limpias. Alexander Dennis ha liderado la integración de tecnologías innovadoras en buses de alta capacidad, garantizando estándares de rendimiento y durabilidad.



Figura 6-33: Fotografía del bus a hidrógeno tipo.

Fuente: Ficha Técnica de Enviro400FCEV [98]

Algunas especificaciones del vehículo son:

- **Dimensiones:** Longitud de 11,1 m, ancho de 2,55 m y altura de 4,3 m, ideal para rutas interurbanas con alta capacidad de pasajeros.
- **Capacidad de pasajeros:** Hasta 88 pasajeros, con hasta 73 asientos distribuidos en ambos niveles (45 en el superior y 28 en el inferior), ofreciendo flexibilidad en configuración y comodidad.
- **Accesibilidad:** Espacios para 1 o 2 sillas de ruedas, con rampa manual en la puerta frontal o rampa eléctrica en la puerta central, cumpliendo con altos estándares de inclusión.
- **Sistema motriz:** Motor eléctrico Voith Electrical Drive System HD con una potencia máxima de 350 kW, acompañado de un sistema de celdas de combustible Ballard FCmove-HD de 45 kW o 60 kW.
- **Autonomía:** Hasta 300 millas (aproximadamente 483 kilómetros) con un solo llenado de hidrógeno a 350 bar, suficiente para cubrir rutas interurbanas.
- **Tanques de hidrógeno:** Capacidad de 29,4 kg a 350 bar, optimizados para operaciones prolongadas.
- **Climatización:** Sistema de calefacción y refrigeración de bomba de calor de cero emisiones, asegurando confort en todas las condiciones climáticas.
- **Tiempo de recarga:** Solo 5 minutos, lo que facilita la operación eficiente entre recorridos.



Durante la selección del vehículo tipo se priorizó tanto la capacidad cumplir con los requerimientos operativos, es decir, capacidad de pasajeros y alcance de la ruta, como igualar las prestaciones técnicas del vehículo de referencia.

El vehículo de referencia corresponde a un bus tipo Pullman de dos pisos con una capacidad aproximada de 50 a 68 pasajeros, diseñado para viajes interurbanos de hasta 3 horas de duración. Estas especificaciones plantean la necesidad de un vehículo que combine alta capacidad de transporte con eficiencia y comodidad para los pasajeros. Por lo que el Enviro400FCEV, es capaz de suplir sin problemas estos requisitos, manteniendo incluso el nivel de confort que se requiere en el servicio de transporte de pasajeros para largas distancias.

Cabe destacar que se ha considerado este modelo no solo porque cumpliera con las exigencias técnicas, sino que también se encuentra disponible comercialmente. Lo cual reduce la incertidumbre que existe acerca de los parámetros al tener sus características plenamente definidas, a diferencia de los vehículos en fase de prototipo o desarrollo.

Dada la dificultad para obtener una cotización precisa del modelo de bus a hidrógeno y la falta de información sobre los costos de buses con las características especificadas (modelos de buses de dos pisos), se realizaron estimaciones para determinar el valor de inversión necesario. Como referencia, se utilizó el costo de un bus eléctrico de dos pisos, el cual, según indicó el actual Ministro de Transportes, Juan Carlos Muñoz, tiene un valor de aproximadamente USD 560.000. Además, tomando en cuenta las estimaciones del estudio de IDTechEx (referenciado previamente en el capítulo 3.1.2.2), que concluye que el precio promedio de un bus FCEV es aproximadamente tres veces mayor que el de un bus diésel y 1.6 veces superior al de un bus eléctrico, se estima que el costo de inversión para la compra del bus a hidrógeno sería de alrededor de **USD 960.000**, cifra que incluiría el impuesto agregado.

6.4.5.2.5 Descripción del camión a hidrógeno tipo.

Como modelo representativo de camión a hidrógeno se seleccionó el **QHM FCEV 44-1000** de la marca **Quantron**, una empresa con presencia en países como Alemania, Suiza y Austria, y que cuenta con una amplia experiencia en soluciones de transporte impulsadas por energías limpias. Quantron se destaca por ofrecer vehículos con tecnología de hidrógeno y eléctrica que cumplen altos estándares de sostenibilidad y rendimiento. Las características generales de este vehículo se detallan a continuación, en la Tabla 6-26.



Figura 6-34: Fotografía del camión a hidrógeno tipo.

Fuente: Ficha Técnica de QHM FCEV 44-1000 [99]

Tabla 6-26: Características del vehículo a Hidrógeno para transporte de carga en caso de estudio.

Característica	Valor	Unidad
Marca	Quantron	-
Modelo	QHM FCEV 44-1000	-
Peso Descargado ¹³	10.000	kg
Peso Cargado	44.000	kg
Depósito de combustible para uso propio	53	kg

Fuente: Elaboración Propia en base a Fichas Técnicas

Para la selección de este vehículo, se priorizó la elección de un modelo que cumpliera con las características necesarias para satisfacer los requerimientos de carga y ruta. En este caso, se requiere que el vehículo sea capaz de igualar las prestaciones del camión del caso de referencia, el cual transporta una carga de aproximadamente 30,6 toneladas en un trayecto de 630 km con duración aproximada de 12 horas. Además, el peso bruto del vehículo (GVW) es superior al del camión de referencia, debido a la presencia de los componentes asociados a los vehículos propulsados por energías limpias (Tanque de H₂, Fuel Cells, baterías, entre otros). Asimismo, para esta aplicación, se requiere un camión diseñado para recorridos de distancia media a larga, con una capacidad

¹³ *Peso descargado según estimación en base a modelos de camiones con tecnologías similares



de tanque adecuada que permita completar el trayecto sin necesidad de recargar múltiples veces, optimizando así la operación logística.

Para determinar el valor de inversión necesario para la compra del vehículo, se realizaron estimaciones debido a las dificultades para obtener una cotización del modelo y la falta de un valor fijo en las redes. Como referencia, se utilizó el valor del modelo NIKOLA FCEV, para el cual sí se obtuvo una cotización. Sin embargo, este modelo no fue considerado para la simulación, ya que no puede transportar más de 27 toneladas de carga. **Para calcular la inversión estimada, se aplicó una interpolación lineal basada en la proporción de valores de modelos de camiones diésel con características similares.** De esta manera, se obtuvo una estimación de inversión de 641.985 USD.

Tabla 6-27: Estimación de costo para vehículo a Hidrógeno para transporte de carga en caso de estudio.

Modelo	Energía	Valor (USD)	GCWR (ton)
Volkswagen - CONSTELLATION 17.230 DC 4800MM MT6 AC	Diésel	74.044	27
Volkswagen - CONSTELLATION 24330 HR 5207 MM AZ12	Diésel	98.010	44
NIKOLA - FCEV	H2	485.000	27
QUANTRON - FCEV	H2	641.985	44

Fuente: Elaboración Propia en base a Anexo de modelos de camiones actuales

6.4.5.2.6 Resumen de parámetros de vehículos a Hidrógeno

A continuación, se presenta una tabla con los valores adoptados, en la cual se marca con un asterisco aquellos parámetros que fueron estimados y posteriormente se presenta la justificación para cada uno. Cabe señalar que estos valores se basan en información publicada en literatura especializada, especificaciones de fabricantes y experiencias documentadas en proyectos previos. Los valores representan un punto de partida para el análisis y serán tratados como parámetros ajustables en caso de obtener información más actualizada o específica en etapas posteriores del estudio.

Tabla 6-28: Parámetros de vehículos a Hidrógeno del modelo

Tipo	Unidad	Bus FCEV	Camión FCEV
Modelos	-	Enviro400FCEV	QHM FCEV 44-1000
Valor*	USD	\$960.000	\$641.985
Consumo*	kg/100km	6,1	7,73
Potencia motor	kW	350	550
Energía Batería	kWh	30	118
Capacidad Tanque	kg	29,4	116
Eficiencia Fuel Cell	-	60%	60%
Eficiencia Batería*	-	90%	90%
Autonomía	km	482	1500
Potencia máxima FC	kW	120	240
Recorrido	km/año	140.000	157.680

*Valores estimados. Ver el Anexo 9.4

Fuente: Elaboración Propia

6.5 Descripción de los Casos Centrales

6.5.1 Ruta 1: Transporte de combustible Antofagasta - Chuquicamata. Región de Antofagasta

El trayecto consiste en una ruta de ida y retorno desde y hasta el taller de la empresa Transcom ubicado en La Chimba, en el sector costero de Antofagasta. El camión inicia su ruta en el taller y se desplaza hasta una planta de carga de combustible en Mejillones, en donde llena su estanque aljibe de combustible para ser entregado en Chuquicamata. Luego, se dirige a ese lugar, en donde se detiene y tarda aproximadamente dos horas en entregar su carga. Posterior a este trayecto de ida inicia su recorrido de vuelta en donde retorna directamente al taller de Transcom en Antofagasta, completando un total 630 km en aproximadamente 12 horas. La ruta completa se puede apreciar en la Figura 6-35 en donde se muestra el recorrido.

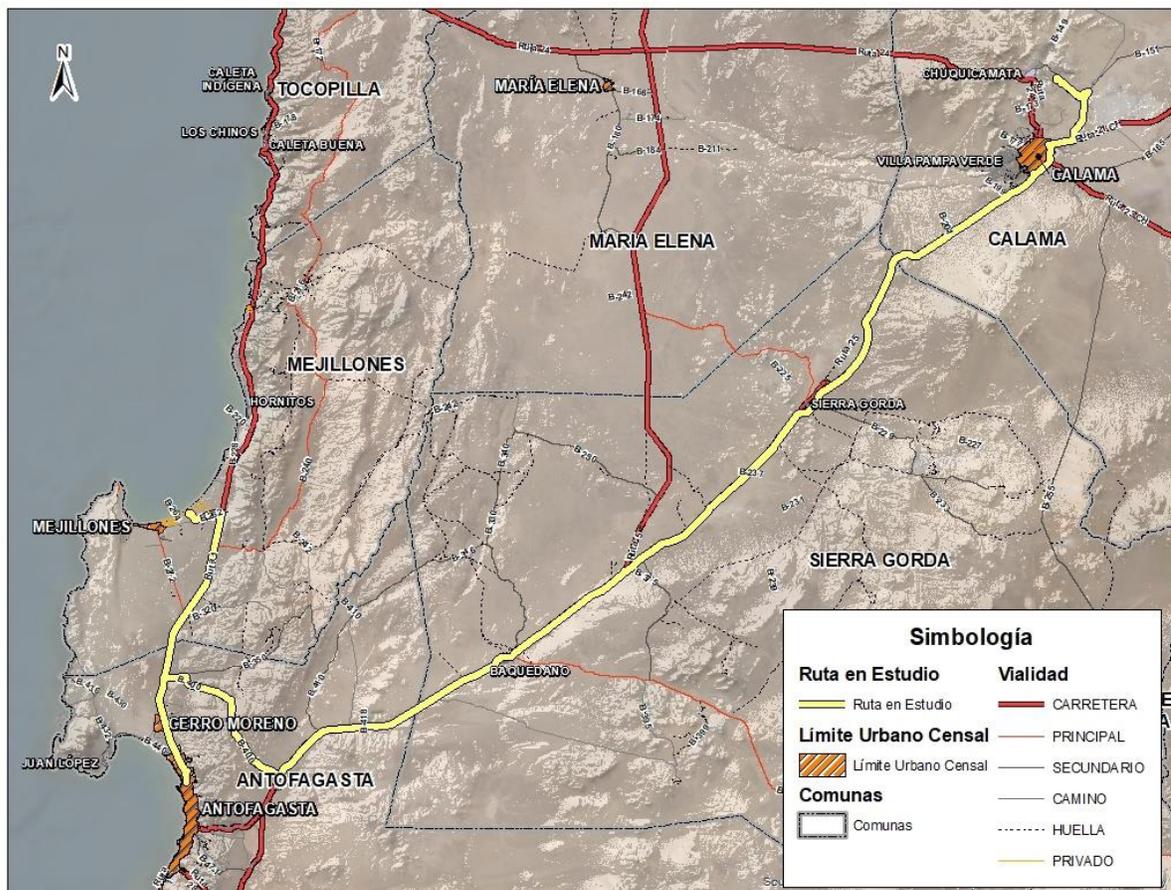


Figura 6-35: Recorrido de la Ruta 1 de transporte de carga

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-36 muestra el perfil de altitudes y velocidades del recorrido, se observa, por ejemplo, que el vehículo no supera los 90 km/h a lo largo de su recorrido, también se aprecia que el vehículo alcanza una altitud de aproximadamente 2.600 m.s.n.m y, como comienza en una zona costera, esta es aproximadamente la cota total que sube el vehículo.

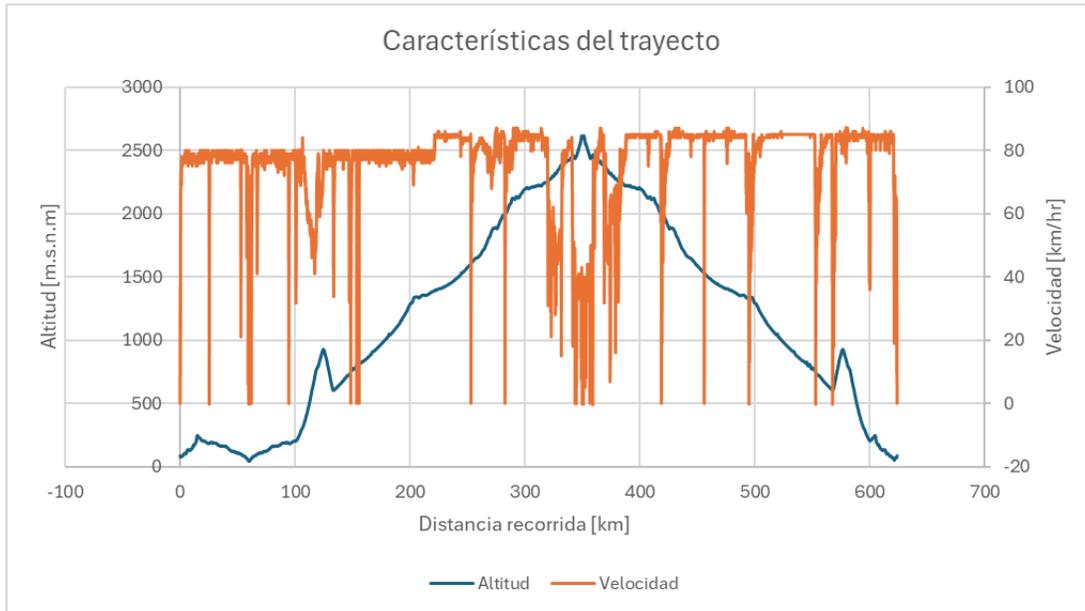


Figura 6-36: Características del trayecto de la Ruta 1 de transporte de carga

Fuente: Elaboración propia

6.5.2 Ruta 2: Transporte de carga Región del Biobío

El trayecto consiste en una ruta de ida y retorno entre las dependencias de una empresa de fabricación de resinas en Concepción, y una planta de procesamiento de celulosa, en la ciudad de Cabrero, trayecto realizado por la empresa Transportes Brett. A continuación, en la Figura 6-37 se muestran un mapa con la ruta realizada, mientras que en la Figura 6-38 se presentan las condiciones de velocidad y altitud de la ruta.

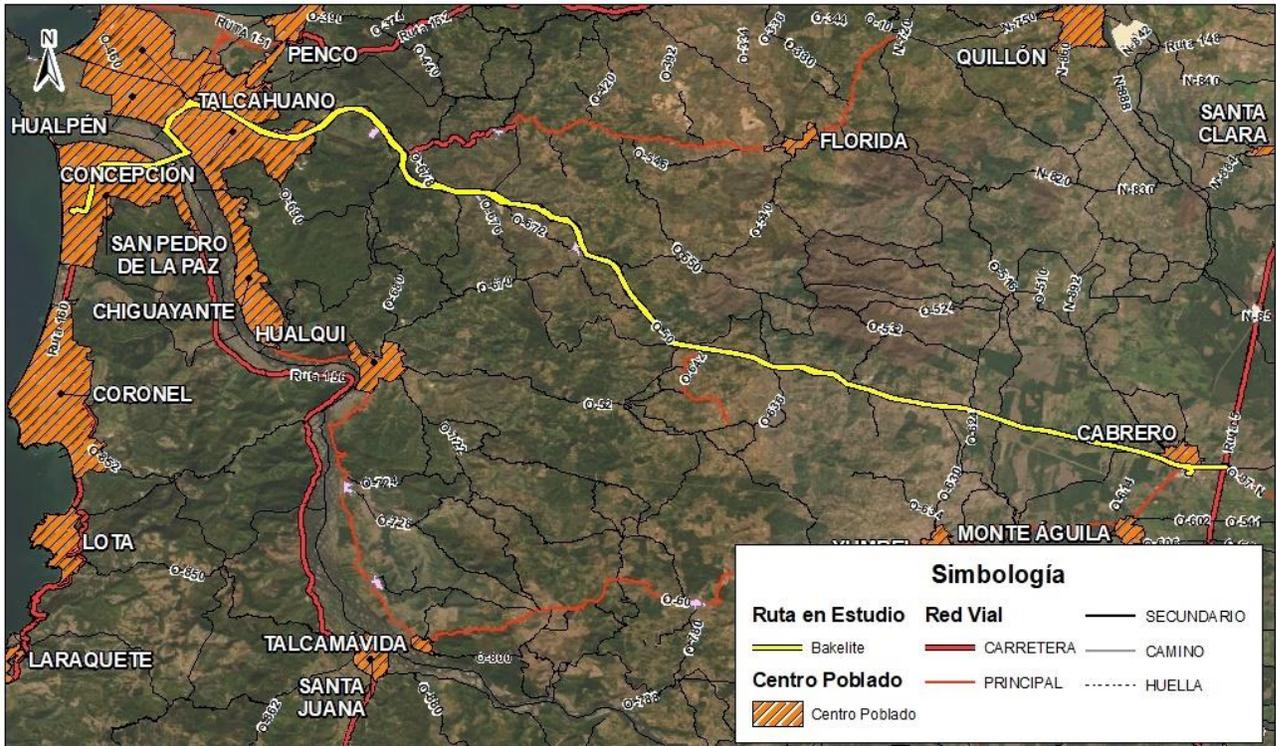


Figura 6-37: Recorrido de la Ruta 2 de transporte de carga

Fuente: Elaboración propia

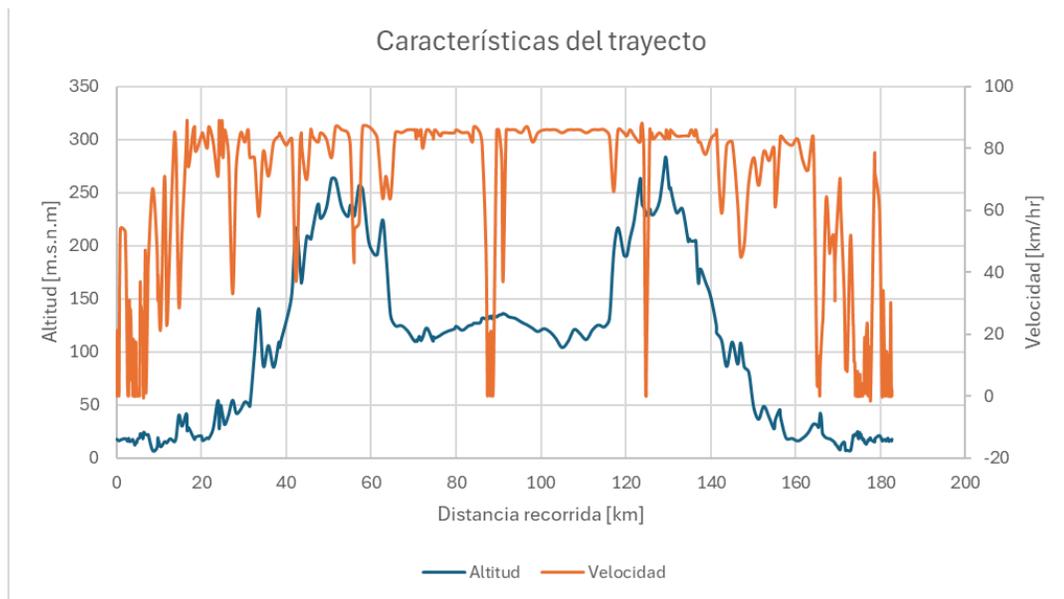


Figura 6-38: Características del trayecto de la Ruta 2 de transporte de carga.

Fuente: Elaboración propia

6.5.3 Ruta 3: Bus Interurbano Antofagasta - Calama. Región de Antofagasta

El trayecto consiste en una ruta de ida y retorno entre los terminales de Turbus Antofagasta y el terminal Turbus de Calama, ambos con una ubicación céntrica en la ciudad. Notemos que, a diferencia del trayecto de la Ruta 1, este servicio alcanza una menor altitud, llegando únicamente a los 2.000 metros de altura por sobre el nivel del mar. Además, el vehículo viaja a una mayor velocidad que el vehículo de la Ruta 1, alcanzando los 100 km/hr.

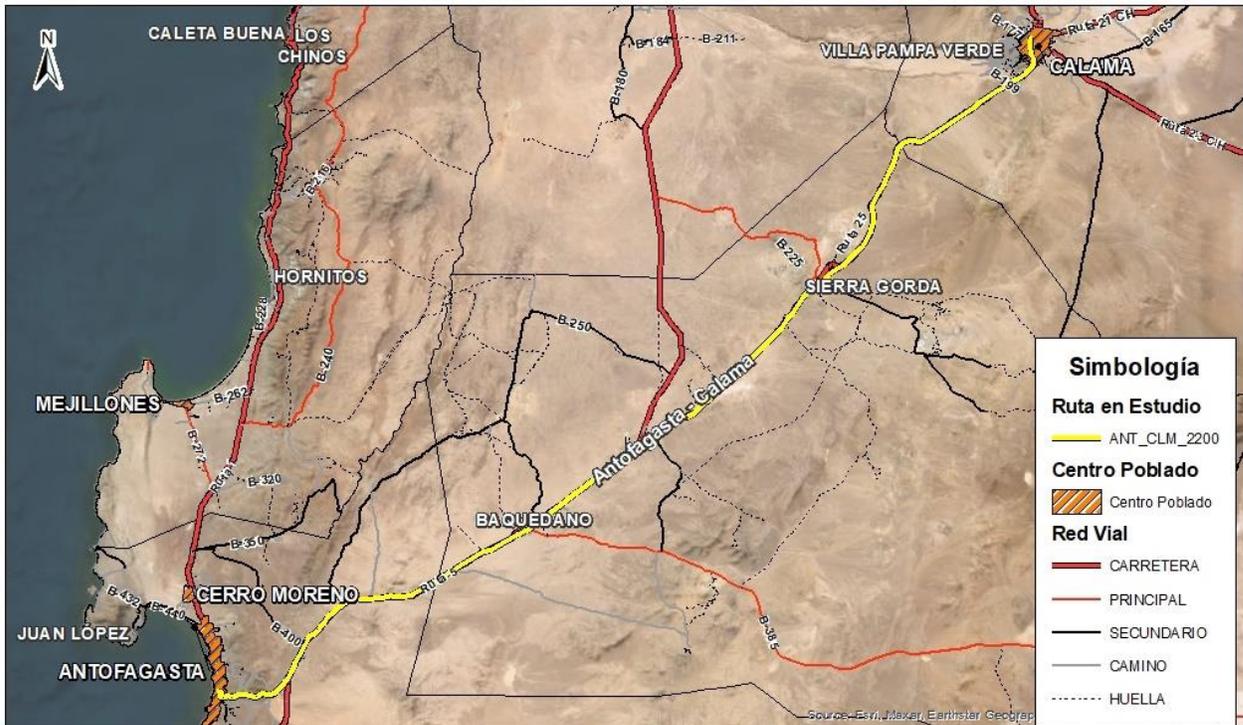


Figura 6-39: Recorrido de la Ruta 3 de transporte de pasajeros

Fuente: Elaboración propia

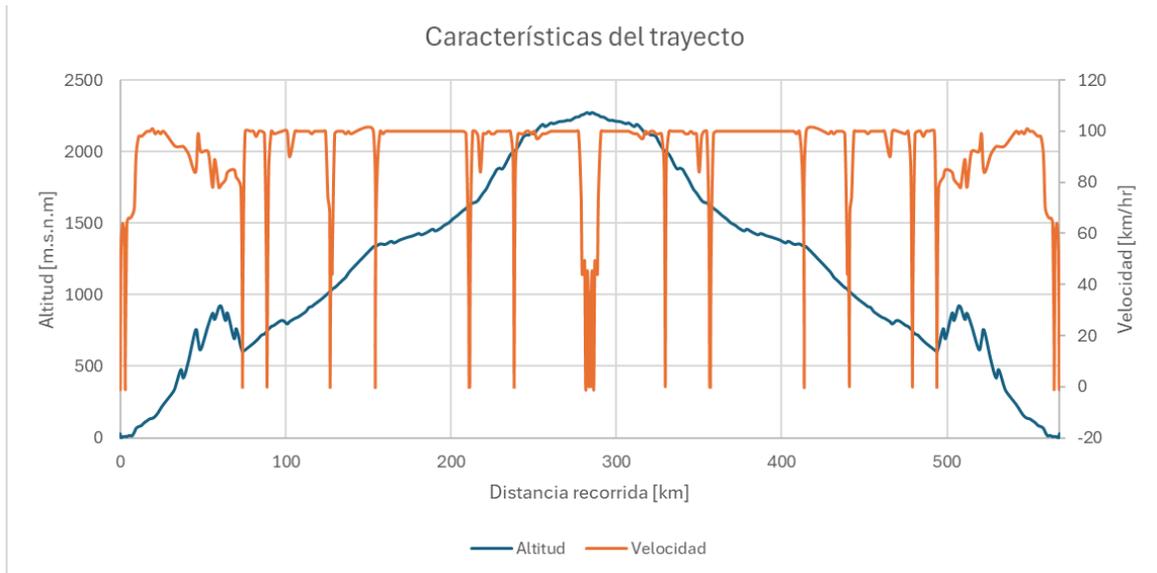


Figura 6-40: Características del trayecto de la Ruta 3 de transporte de pasajeros.

Fuente: Elaboración propia

6.5.4 Ruta 4: Bus Interurbano Concepción - Chillán. Región del Biobío

El trayecto consiste en una ruta de ida y retorno entre los terminales de Turbus Concepción y la ciudad de Chillán. Tal como se mencionó anteriormente, el trayecto originalmente se correspondía entre la ciudad de Concepción y Santiago, pero para acotar el recorrido a la región de interés se realizó una adaptación en la que se cortó el recorrido al interior de la ciudad de Chillán.

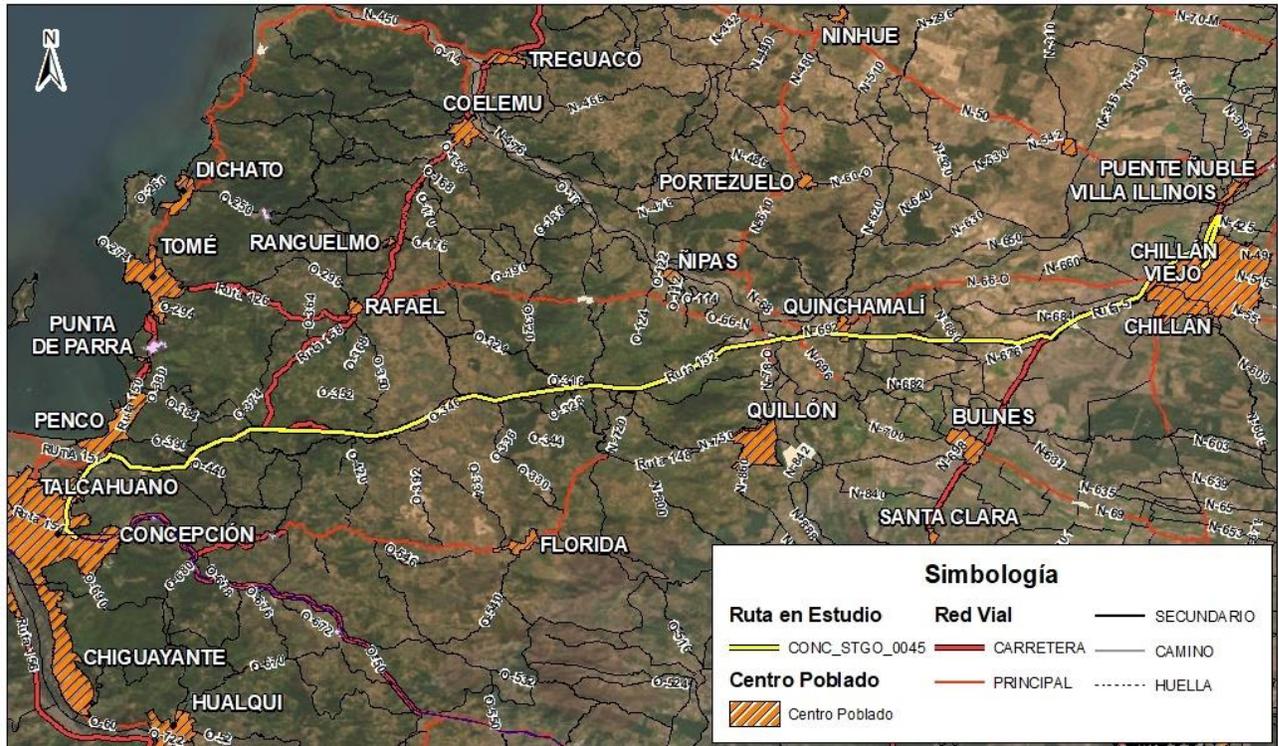


Figura 6-41: Recorrido de la Ruta 4 de transporte de pasajeros

Fuente: Elaboración propia

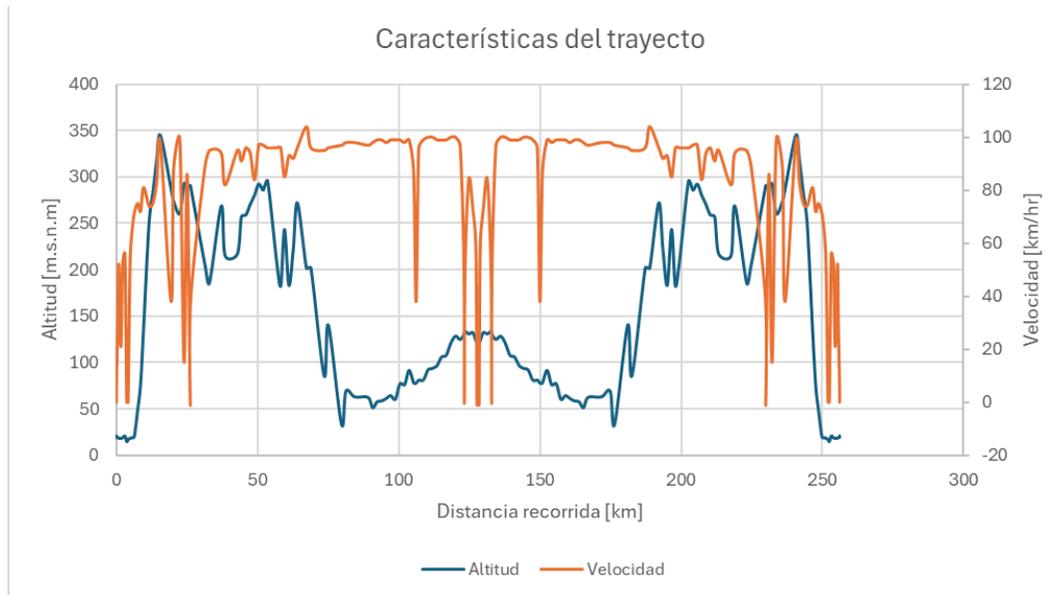


Figura 6-42: Características del trayecto de la Ruta 4 de transporte de pasajeros.

Fuente: Elaboración propia

6.6 Resultados

6.6.1 Resultados Comparativos de los Casos Centrales

Se presentan a continuación los resultados de las simulaciones de desempeño de vehículos diésel (ICEV) y de pila de combustible (FCEV) para los casos centrales, con condiciones nominales, en cada una de las rutas.

Tabla 6-29: Rutas simuladas

Ruta	Servicio	Recorrido
Ruta 1	Carga	Antofagasta - Chuquicamata
Ruta 2	Carga	Concepción - Cabrero
Ruta 3	Pasajeros	Antofagasta - Calama
Ruta 4	Pasajeros	Concepción - Chillán

Fuente: Elaboración propia

A efecto de consumo de energía, se puede observar cómo los vehículos tipo FCEV consumen sistemáticamente menos energía que los ICEV, con reducciones del orden del 10% en camiones y del 25% en autobuses. Este consumo más bajo se explica por el mayor rendimiento del vehículo y por su capacidad de recuperación de energía de frenado.

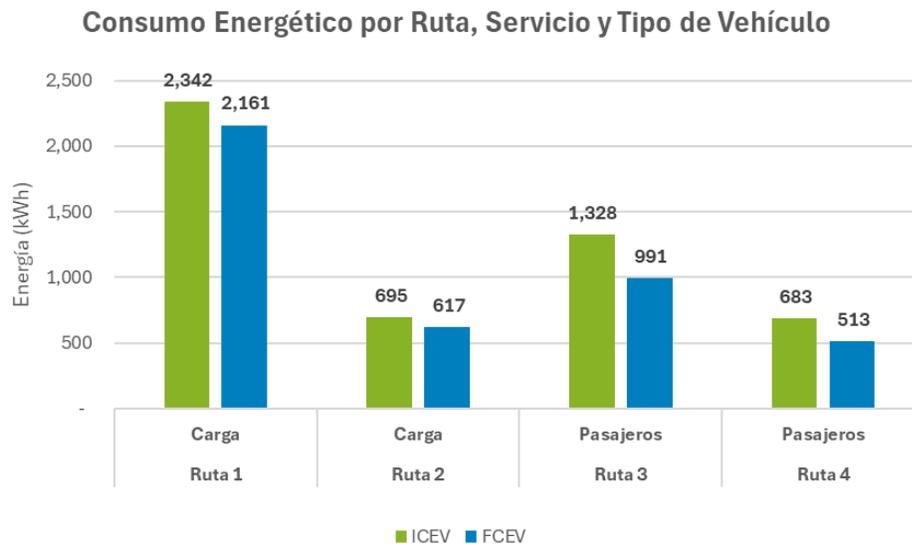


Figura 6-43: Consumo de energía por ruta y tipo de vehículo

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 6-30 y la Tabla 6-31 se muestran los resultados generales de los casos centrales simulados.

Tabla 6-30: Resultados técnicos de la simulación de vehículos diésel.

Combustible	Vehículo	Ruta	Distancia recorrida	Consumo Diesel	Rendimiento Diesel	Potencia Máxima ¹⁴	Potencia Media
			km	l	km/l	kW	kW
Diésel	Camión	Antofagasta	624	235,7	2,65	394,1	102,2
	Camión	Biobío	183	70,0	2,61	118,2	34,4
	Bus	Antofagasta	568	133,7	4,25	218,9	82,5
	Bus	Biobío	256	68,7	3,73	96,3	68,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-31: Resultados técnicos de la simulación de vehículos con Fuel Cell

Combustible	Vehículo	Ruta	Distancia recorrida	Consumo Hidrógeno	Rendimiento Hidrógeno	Rendimiento Hidrógeno	Potencia Máxima ¹⁵	Potencia Media
			km	kg	km/kg	kg/100km	kW	kW
Fuel Cell	Camión	Antofagasta	624	52,75	11,82	8,46	399,1	105,3
	Camión	Biobío	183	15,27	11,96	8,36	120,9	34,9
	Bus	Antofagasta	568	24,82	22,88	4,37	196,5	74,2
	Bus	Biobío	256	12,80	20,02	5,00	67,9	58,6

Fuente: Elaboración propia

A efectos de los costos de explotación, condensados en el indicador TCO (Costo Total de Propiedad), se observa que, en dichas condiciones centrales, los vehículos tipo FCEV no pueden competir con los ICEV ni en el presente ni en un futuro cercano. Para este análisis, se han evaluado las mismas rutas de explotación, considerando el inicio de la actividad en 2025, 2030 y 2035. Los resultados se presentan en la tabla siguiente, la cual muestra un ratio entre los TCO de ambos tipos de vehículos, calculado como el cociente entre el TCO del FCEV y el TCO del ICEV.

¹⁴ Potencia referida al percentil 99 de las potencias calculadas. Con la finalidad de evitar mostrar una potencia ficticia fuera del rango.

¹⁵ Potencia referida al percentil 99 de las potencias calculadas. Con la finalidad de evitar mostrar una potencia ficticia fuera del rango.

Tabla 6-32: TCO para todas las rutas en tres horizontes temporales distintos

Inicio de actividades	Ruta	Servicio	TCO ICEV (MMCLP)	TCO FCEV (MMCLP)	Ratio
2025	Ruta 1	Carga	684	1.110	162%
	Ruta 2	Carga	686	1.106	161%
	Ruta 3	Pasajeros	661	1.227	186%
	Ruta 4	Pasajeros	690	1.248	181%
2030	Ruta 1	Carga	727	914	126%
	Ruta 2	Carga	709	911	129%
	Ruta 3	Pasajeros	702	1.078	153%
	Ruta 4	Pasajeros	732	1.090	149%
2035	Ruta 1	Carga	769	880	115%
	Ruta 2	Carga	748	879	117%
	Ruta 3	Pasajeros	737	1.063	144%
	Ruta 4	Pasajeros	767	1.073	140%

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan de forma gráfica la comparativa entre el TCO de las dos tecnologías evaluadas. En cada una de ellas se muestra, sobre la barra que corresponde al TCO de los FCEV, **la diferencia porcentual (Δ)** del TCO de un FCEV con respecto a un ICEV. Dado que el Δ mostrado corresponde a la diferencia porcentual, al compararlo con los valores de Ratio de la Tabla 6-32, se obtiene la siguiente relación:

$$\text{Ratio} = 100\% + \Delta$$

Ecuación 38

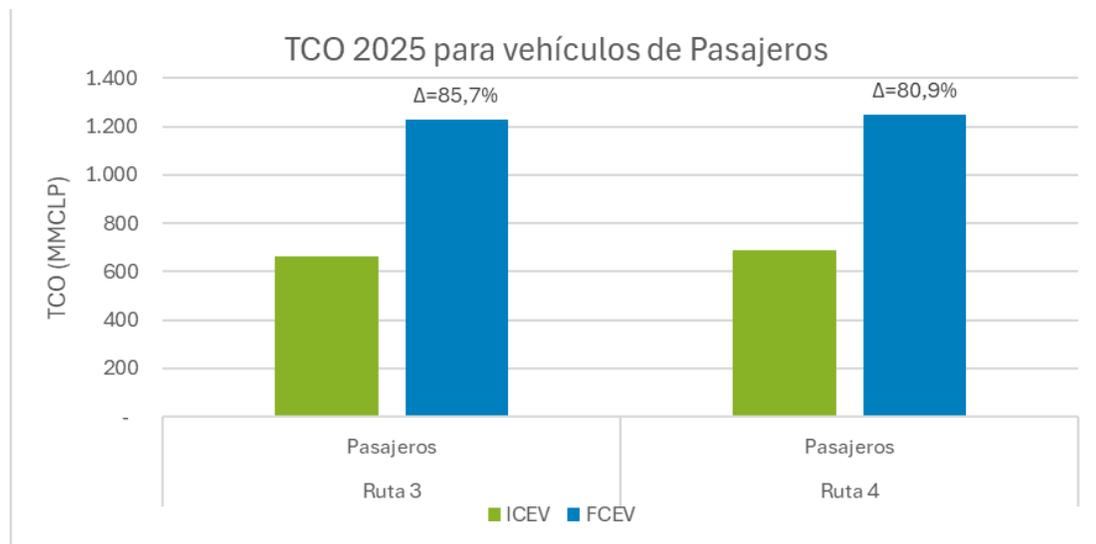
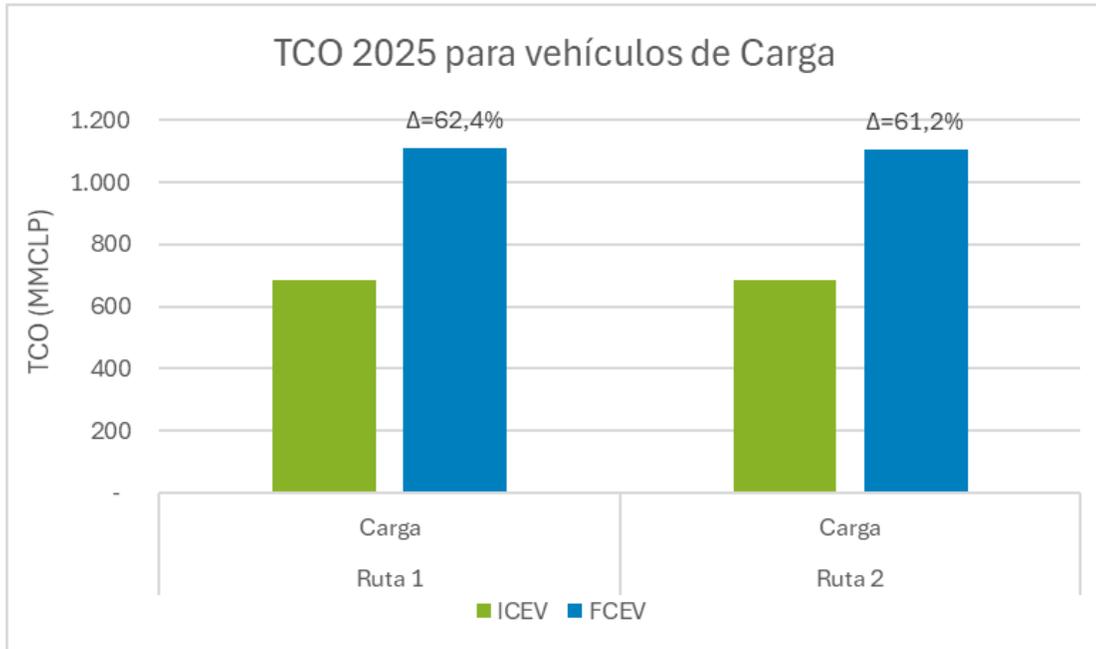


Figura 6-44: TCO por ruta y tipo de vehículo al año 2025 como inicio de operación

Fuente: Elaboración propia

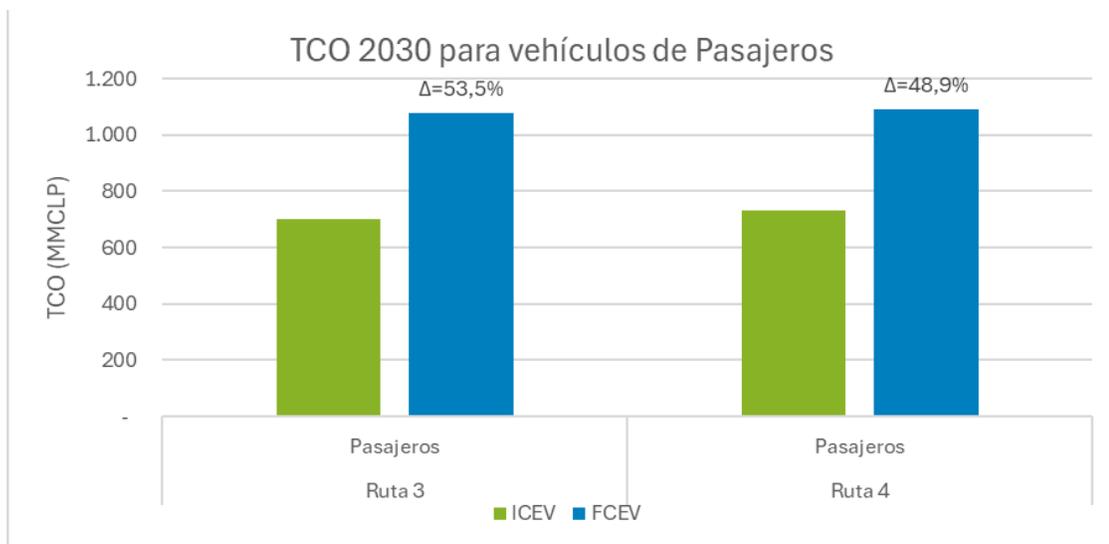
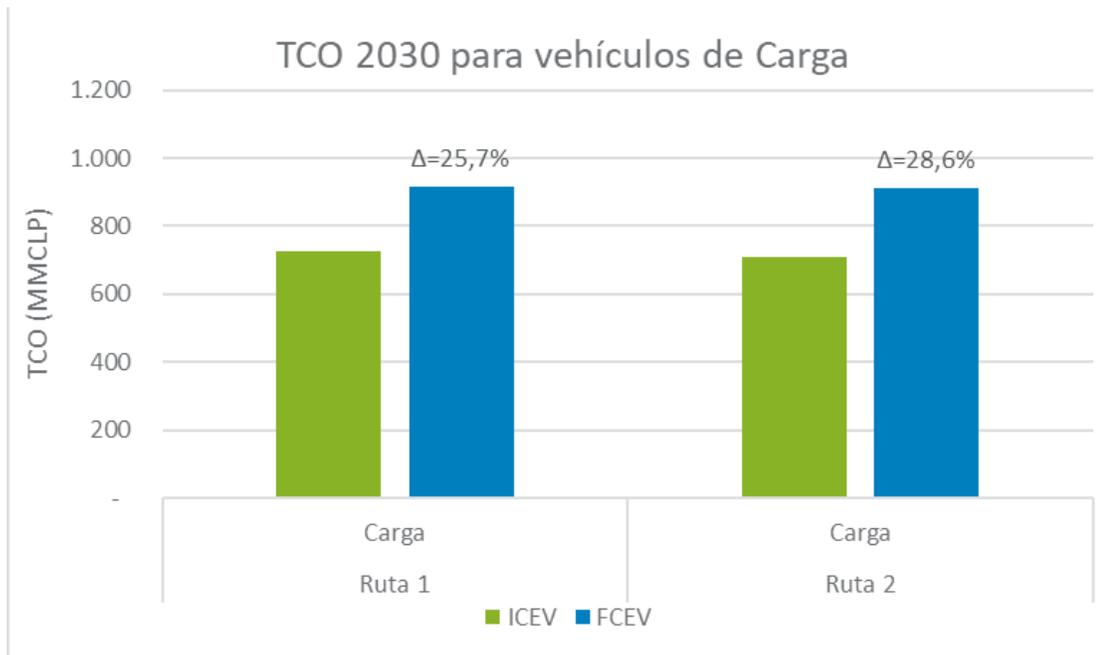


Figura 6-45: TCO por ruta y tipo de vehículo al año 2030 como inicio de operación

Fuente: Elaboración propia

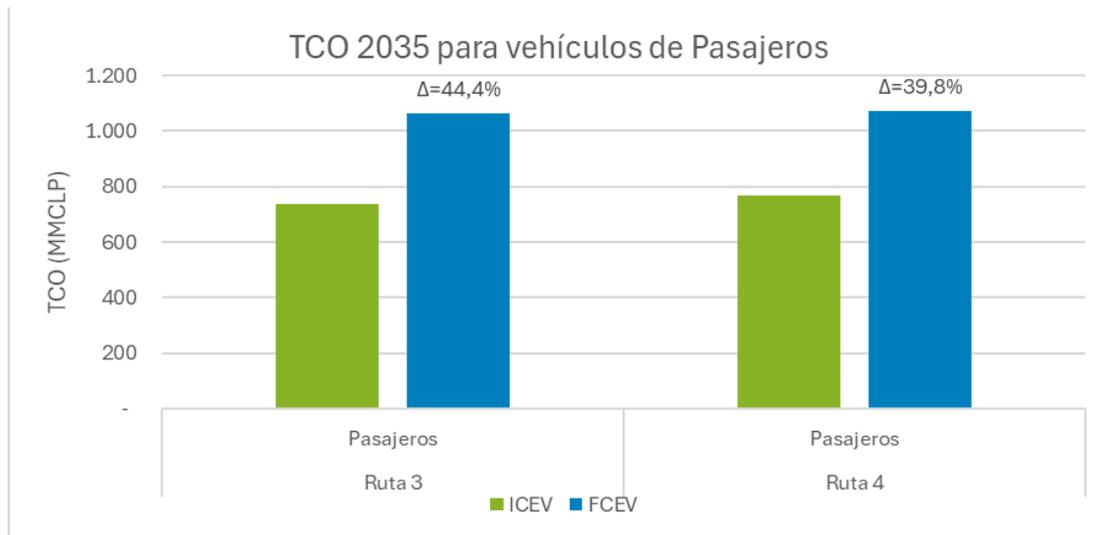
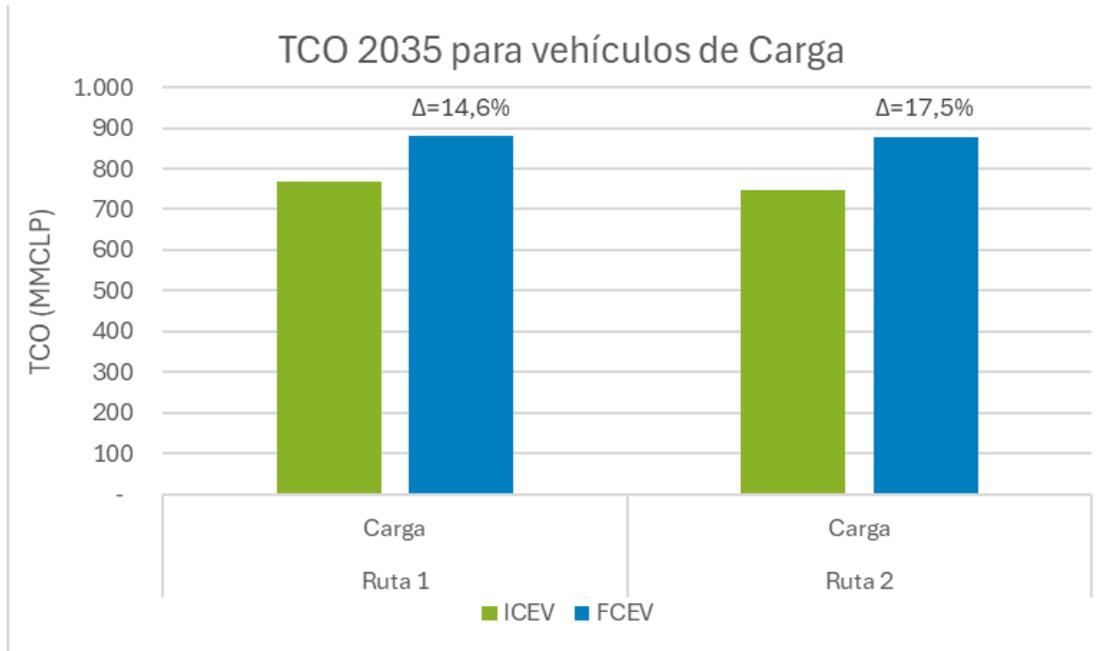


Figura 6-46: TCO por ruta y tipo de vehículo al año 2035 como inicio de operación

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presenta la evolución del ratio entre los TCO de los vehículos FCEV e ICEV.

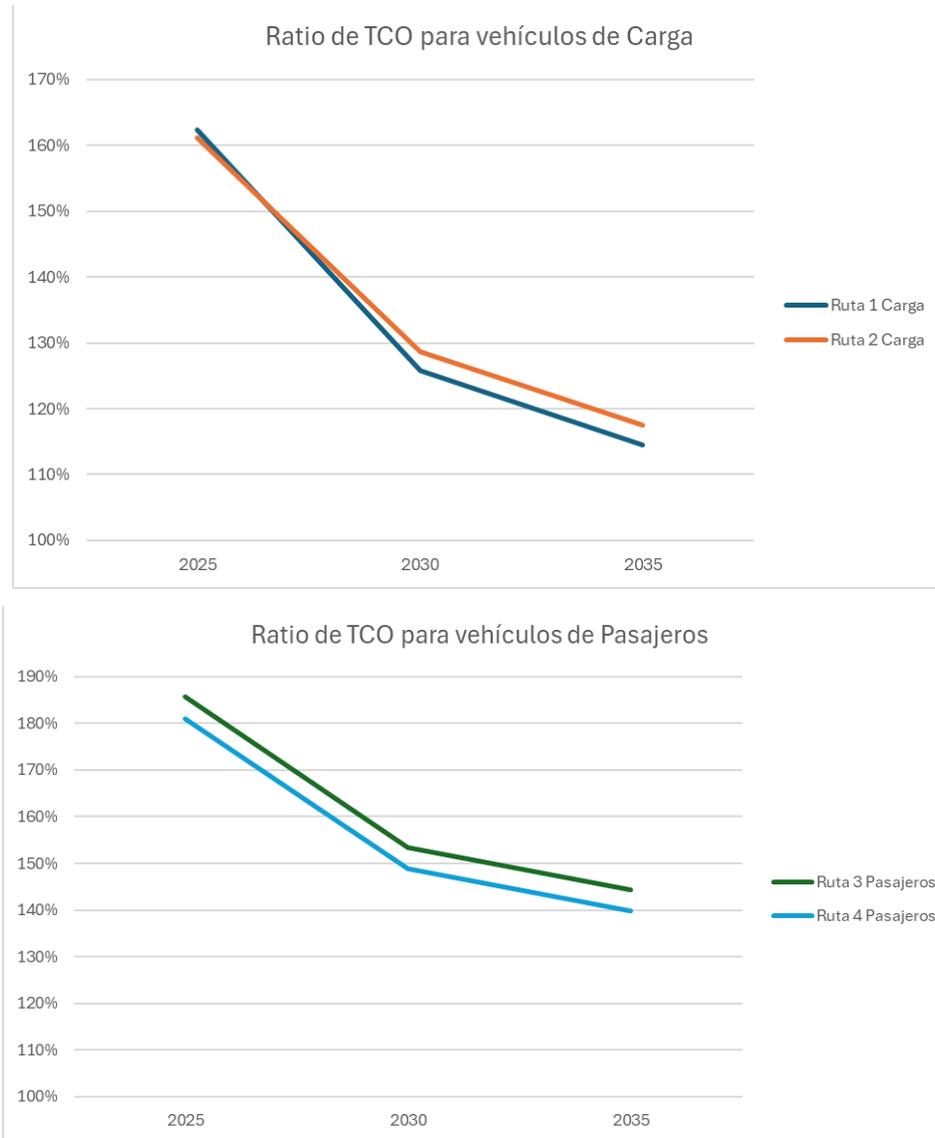


Figura 6-47: Evolución del ratio entre los TCO de los vehículos FCEV y los de los ICEV

Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede observar tanto en la Figura 6-44, como en la Figura 6-45, Figura 6-46 y Figura 6-47, el TCO de los vehículos a hidrógeno de carga pesada es superior al de los vehículos diésel en los escenarios centrales, aun iniciando las actividades en el año 2035 en donde se espera que tanto el costo de inversión como el de operación de los FCEV hayan disminuido. Esto se ve mejor representado en la Figura 6-47, en donde se muestra la evolución del ratio (o la fracción) del TCO del FCEV con respecto al ICEV. En esta representación se entiende que el costo de propiedad de un vehículo a hidrógeno será competitivo cuando la línea baje del valor 100%, dando a entender que el TCO del FCEV es inferior al del ICEV. En esta gráfica existe una marcada evolución hacia la paridad, es decir, un ratio con valor 100%, a medida que se retrasa el inicio de explotación, pero, al menos en el escenario central, no se logra alcanzar este valor.

La disparidad inicial se debe principalmente al alto coste de adquisición de los vehículos de hidrógeno en la actualidad y, en una menor medida, a los costes de operación de los vehículos con esta tecnología. Por otro lado, la tendencia a la baja se debe a las expectativas que se tienen de las tecnologías del hidrógeno. Al tratarse a un mercado no desarrollado, se espera una reducción tanto en la inversión como en los costos operativos. Sin embargo, se observa que incluso con estas expectativas, los costos de los FCEV no consigan igualar a sus contrapartes IECV incluso en 2035.

6.6.2 Sensibilización Técnica del Consumo de Energía

Se han simulado distintos escenarios de viento y temperatura ambiente para los que se ha determinado el consumo energético de los vehículos con celda de combustible. Para permitir un análisis comparativo, se ha determinado el rendimiento energético como el consumo por kilómetro promedio en cada trayecto y servicio.

En los gráficos siguientes se presentan las sensibilizaciones de los distintos servicios con el viento y la temperatura ambiente. Tal como se puede observar, la influencia de la temperatura es muy inferior a la del viento en todos los casos, pero, además, la afectación de éste es mucho mayor en los buses que en los camiones. Esto se explica con el hecho de que la fuerza de arrastre, que es la fuerza afectada por las condiciones meteorológicas, no depende de la masa del vehículo, por lo tanto, los camiones al ser más pesados que los buses, se ven proporcionalmente menos afectados por esta fuerza, tomando mayor protagonismo, en estos casos, otras fuerzas como la gravedad o la resistencia a la rodadura, las cuales sí escalan con la masa del vehículo. Por otro lado, la variabilidad¹⁶ en los buses se encuentra entre un 13,6% y un 27,7%, mientras que en los camiones no supera el 5%.

De estos gráficos se observa, también, que no existen diferencias sustanciales entre la variabilidad en el consumo entre los vehículos diésel en comparación con los FCEV, teniendo estos consumos una variabilidad en torno al 3% por sobre los IECV en el caso de los buses y en torno al 0,1% en el caso de los camiones.

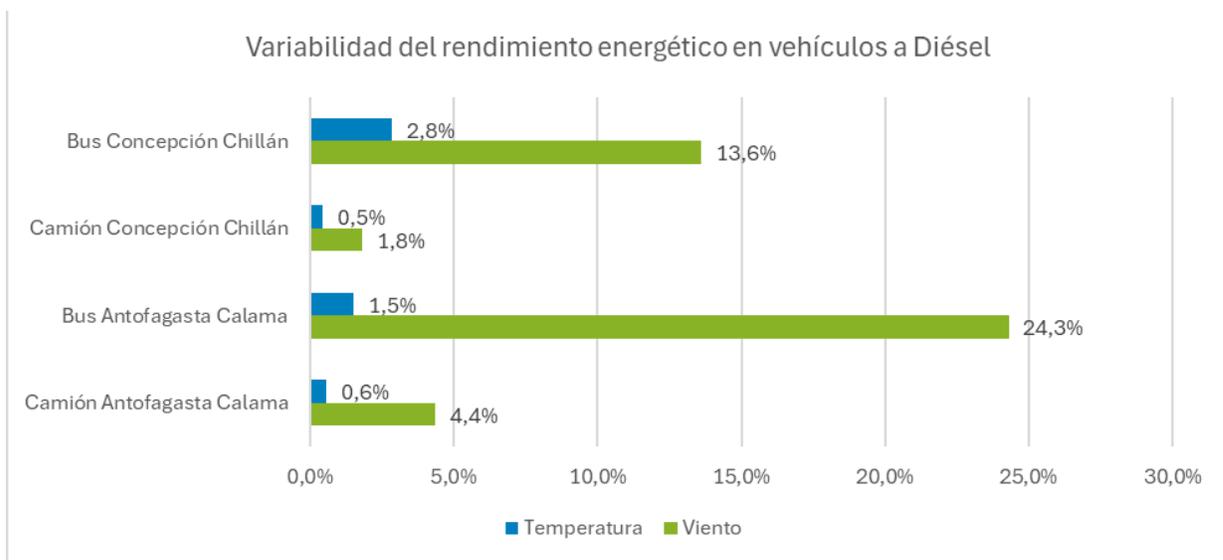


Figura 6-48: Variabilidad del rendimiento de los vehículos diésel en función de las condiciones meteorológicas

Fuente: Elaboración propia

¹⁶La variabilidad corresponde a una medida de la dispersión de los valores de una muestra con respecto a su valor central. En este caso, la variabilidad corresponde a la desviación porcentual que poseen los rendimientos de los energéticos con respecto al valor esperado, representado por el rendimiento en el caso central.

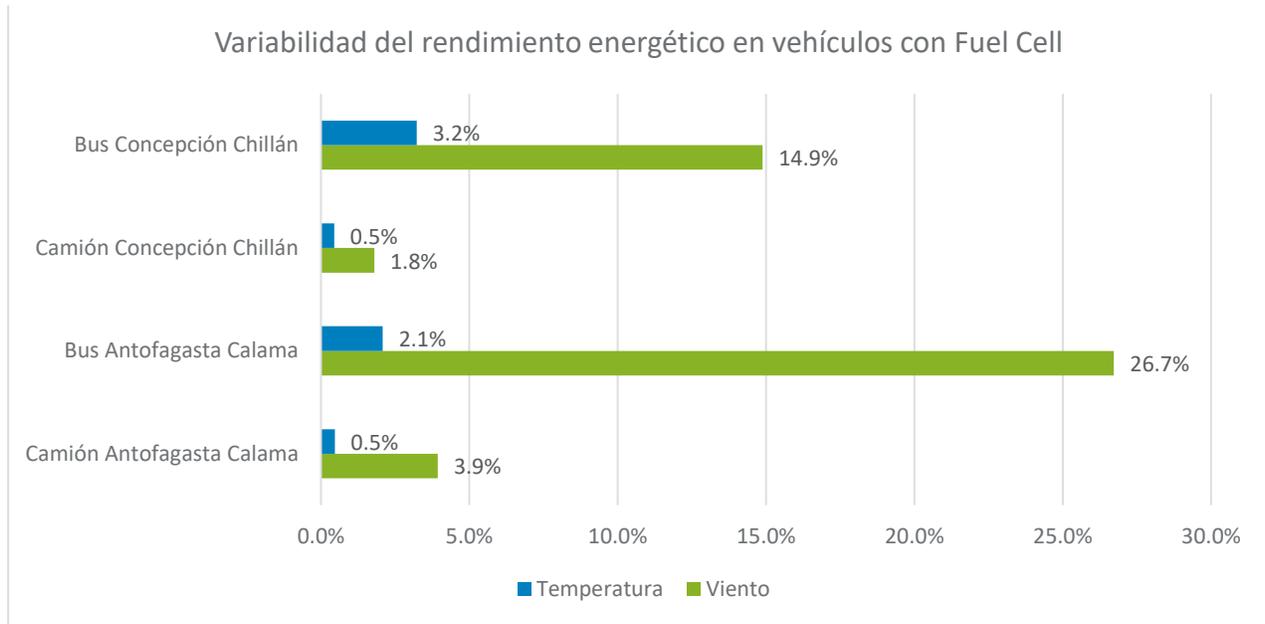


Figura 6-49: Variabilidad del rendimiento de los vehículos con Fuel Cell en función de las condiciones meteorológicas

Fuente: Elaboración propia

Luego, se presentan los consumos específicos en términos absolutos para los cuatro vehículos simulados en las distintas rutas. Los resultados se muestran en la Figura 6-50 y la Figura 6-51 como diagramas de caja y bigote representando la variabilidad que dan las condiciones ambientales combinadas al consumo específico de combustible del caso evaluado. De estos gráficos se desprende que:

- El consumo específico de camiones no varía sustancialmente entre las regiones en ninguna de las dos tecnologías, encontrándose en torno a los 37,0 a 38,5 l/100km en el caso de los camiones diésel y, por su parte, en torno a los 8,2 a 8,6 kg/100km en los vehículos con Fuel Cell.
- El consumo de los buses, además de tener una mayor variabilidad como se indicó anteriormente, también poseen una diferenciación importante en el rendimiento según en la región en donde se encuentren. En este caso se observa que el consumo específico es levemente superior en el caso de la ruta en la región del Biobío, posiblemente debido a la variabilidad en la velocidad del trayecto, es decir, el bus en Biobío se encuentra menos proporción del tiempo a velocidad crucero, por lo que los cambios en la velocidad implicarían aceleraciones o frenadas que aumentan el consumo de combustible.

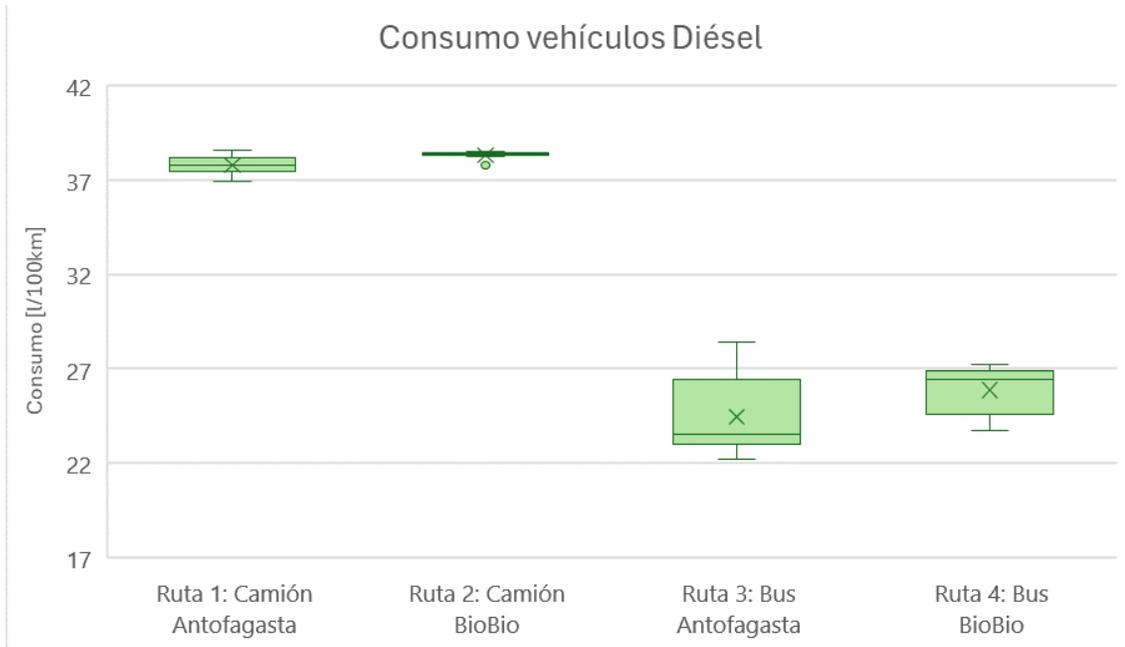


Figura 6-50: Variabilidad del rendimiento energético de los vehículos Diésel.

Fuente: Elaboración propia

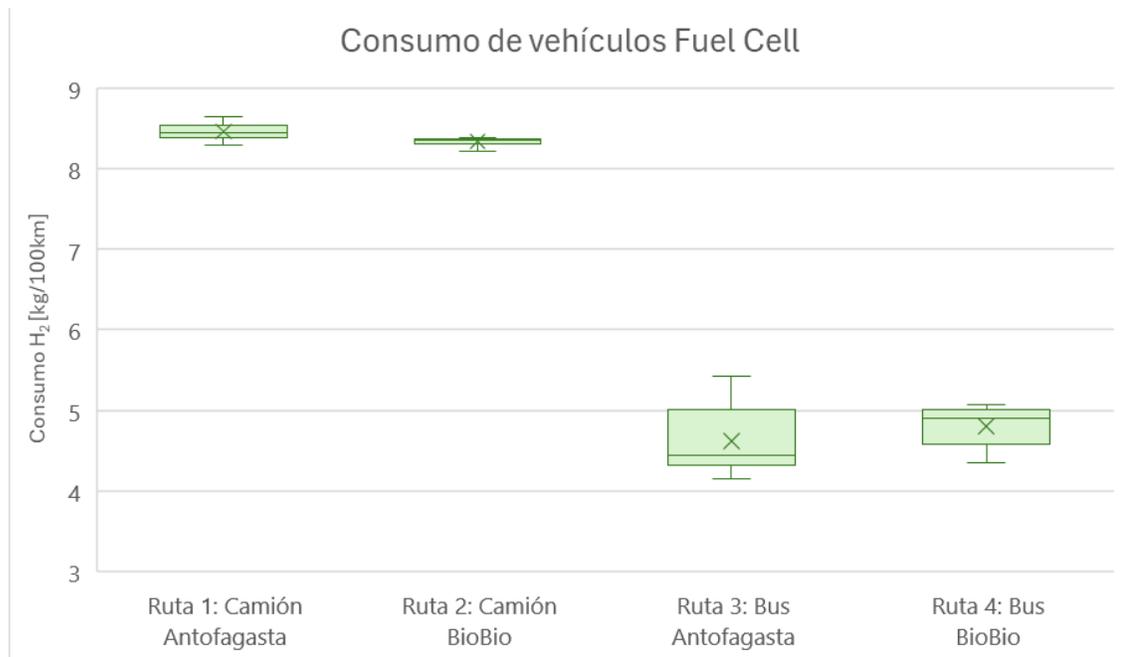


Figura 6-51: Variabilidad del rendimiento energético de los vehículos con Fuel Cell.

Fuente: Elaboración propia

6.6.3 Sensibilización del TCO con los Costos de la Energía y de Inversión

Se han simulado de forma cruzada tres escenarios de evolución de precios de H2V y tres de evolución de diésel, lo que da lugar a 9 casos de costos de la energía que generan, a su vez, 9 casos de TCO para cada tecnología en cada ruta y en cada escenario temporal de inicio del servicio. Además, se han generado dos escenarios distintos de evolución de los costos de inversión de los vehículos FCEV, uno conservador y otro optimista, en el cual se logran reducir los costos en un 50% para 2035.

Con estos escenarios, se ha calculado la evolución del TCO en el tiempo, tomando en consideración para cada año de inicio de explotación los costos de la energía y los costos de inversión asociados. Se presenta este análisis para cada una de las rutas, observándose tres conjuntos de resultados, uno para diésel, otro para H2 con costos de inversión conservadores y otro para H2 con costos de inversión objetivo para competitividad. Tal como se puede observar, los costos de inversión afectan en mayor medida a la competitividad de la tecnología Fuel Cell versus el diésel, lo que se hace patente en que sólo las series de datos H2 Objetivo, logran cruzar las del diésel antes de 2035. Se observa que las series de tiempo para valores de inversión conservadores no logran competir con los vehículos diésel ni en los escenarios alcistas para este combustible. Esto indica que se requiere un desarrollo acelerado del mercado de las Fuel Cell para que esta tecnología se vuelva competitiva.

Otro punto importante a destacar es el hecho de que el potencial de competitividad de los camiones es superior al de los buses ya que las curvas de los costos en el caso de estos vehículos se cruzan, aún en los escenarios de desarrollo acelerado, recién en el 2035, mientras que en el caso de los camiones se aprecian cruces previos incluso al 2030 en los escenarios más optimistas.

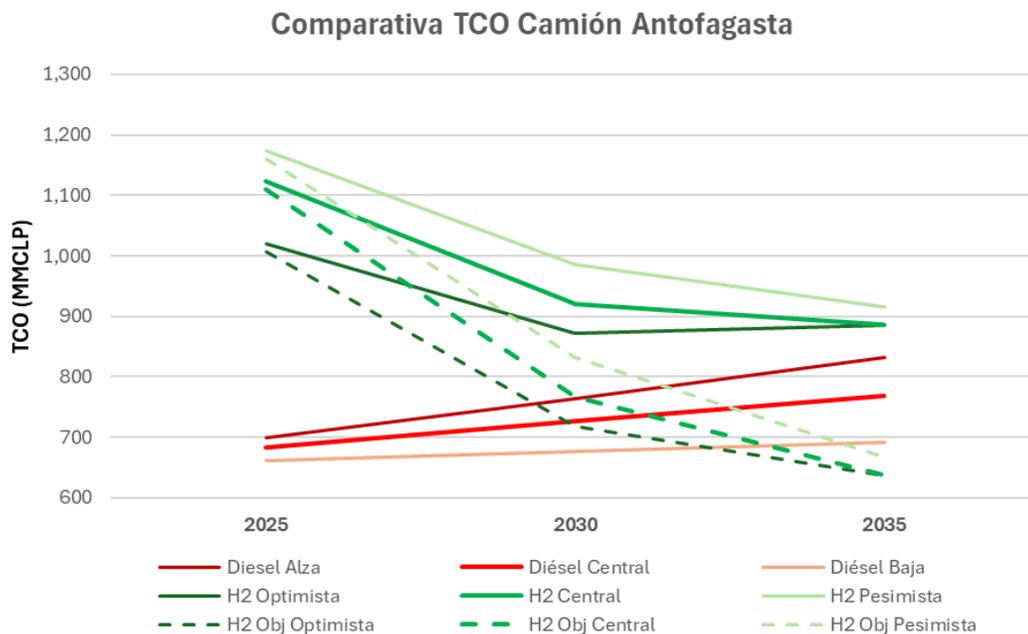


Figura 6-52: Comparativa TCO Recorrido 1 en función de los costos de los energéticos y de inversión

Fuente: Elaboración propia

Comparativa TCO Camión Biobío

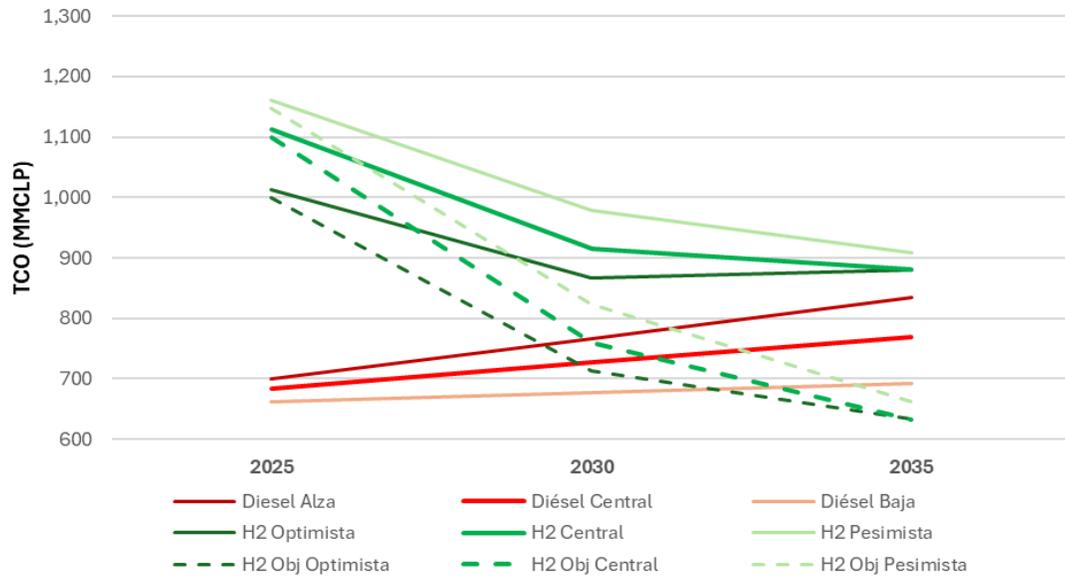


Figura 6-53: Comparativa TCO Recorrido 2 en función de los costos de los energéticos y de inversión

Fuente: Elaboración propia

Comparativa TCO Bus Antofagasta

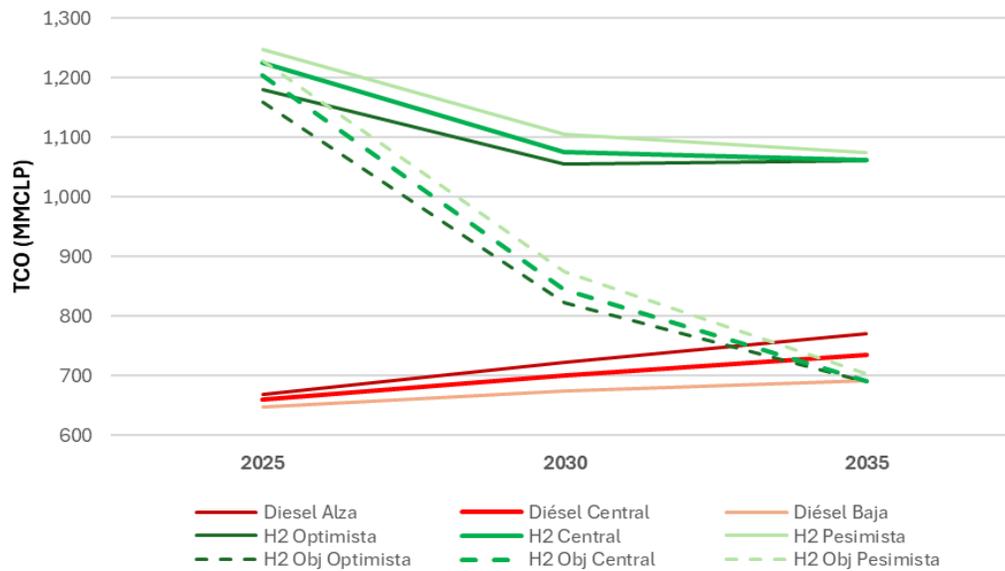


Figura 6-54: Comparativa TCO Recorrido 3 en función de los costos de los energéticos y de inversión

Fuente: Elaboración propia

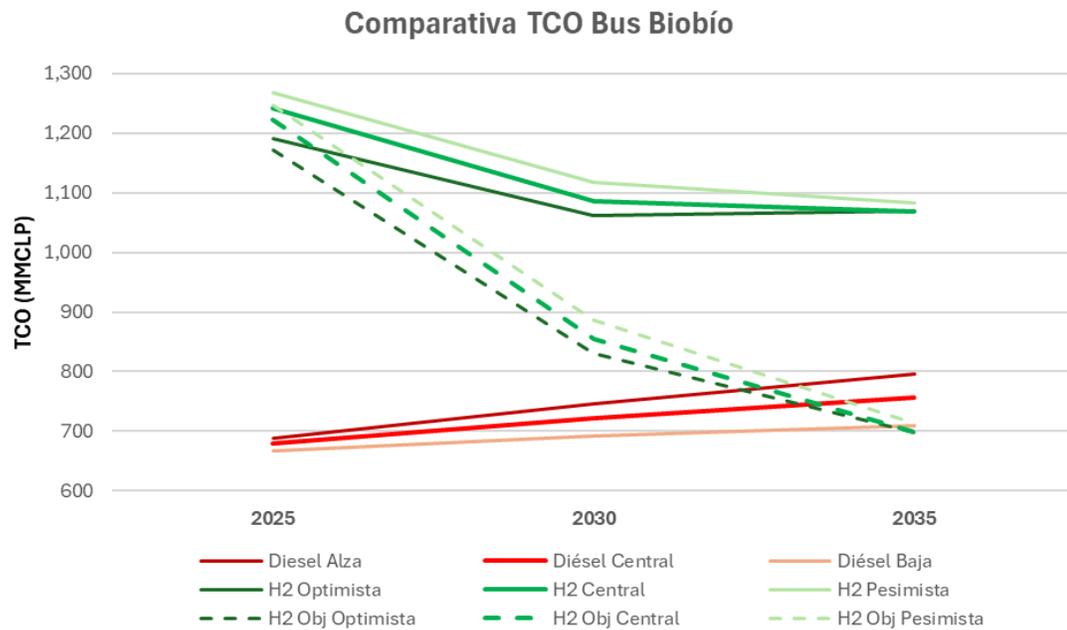


Figura 6-55: Comparativa TCO Recorrido 4 en función de los costos de los energéticos y de inversión

Fuente: Elaboración propia

6.6.4 Estimación y Sensibilización del OPEX con los Costos de la Energía.

Como se analizó anteriormente, el TCO está fuertemente afectado por el alto costo de la tecnología en la actualidad, por lo que se estima que ésta se volvería competitiva únicamente si los costes de inversión descendieran bruscamente en los próximos años. Para independizar el análisis de la inversión, se estudian los costos de operación y mantenimiento, más conocidos como OPEX, de las tecnologías evaluadas, comparando principalmente los casos centrales de los precios de los combustibles, pero mostrando los rangos de precios esperables según los escenarios de cada caso. Para ello, se muestra en las figuras a continuación, una gráfica comparativa entre el costo operacional anual promedio estimado de cada uno de los vehículos en las diferentes rutas simuladas. La línea sólida indica el OPEX en el caso central del precio del combustible, mientras que la región sombreada muestra el rango de valores esperables para cada variable, identificando, además, la diferencia porcentual entre los costos operacionales entre cada tecnología en los periodos evaluados.

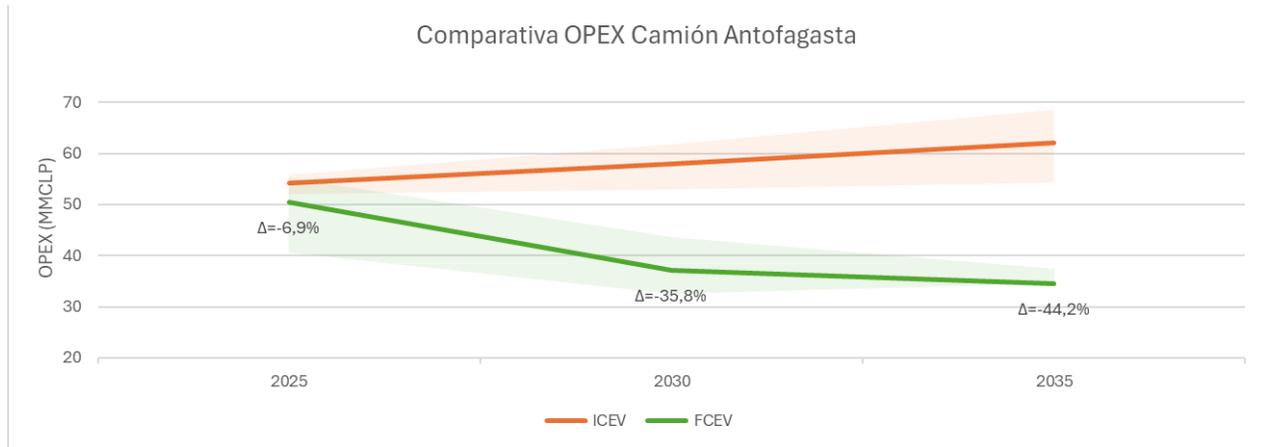


Figura 6-56: Comparativa OPEX de la Ruta 1.

Fuente: Elaboración propia

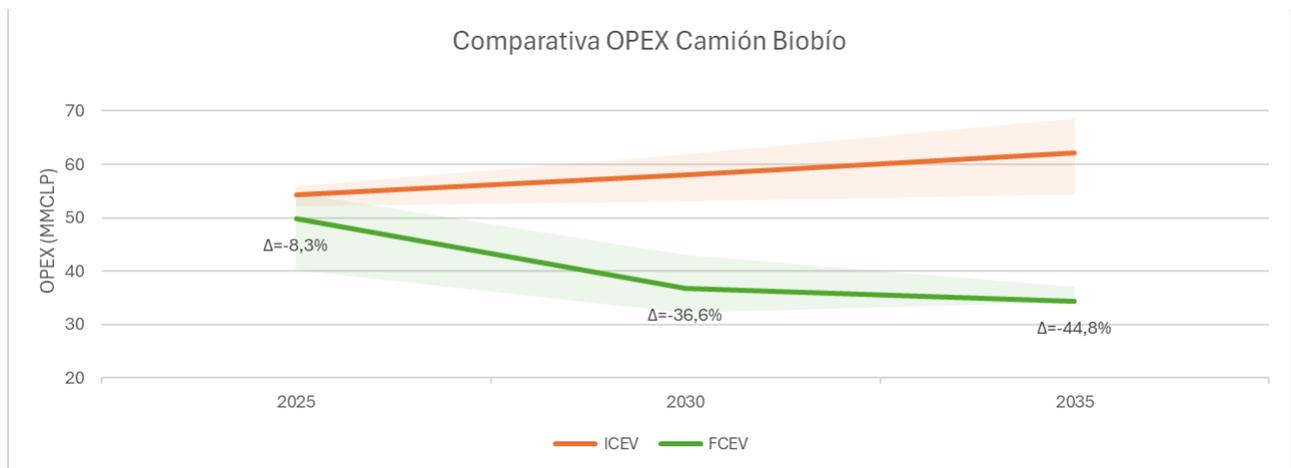


Figura 6-57: Comparativa OPEX de la Ruta 2.

Fuente: Elaboración propia

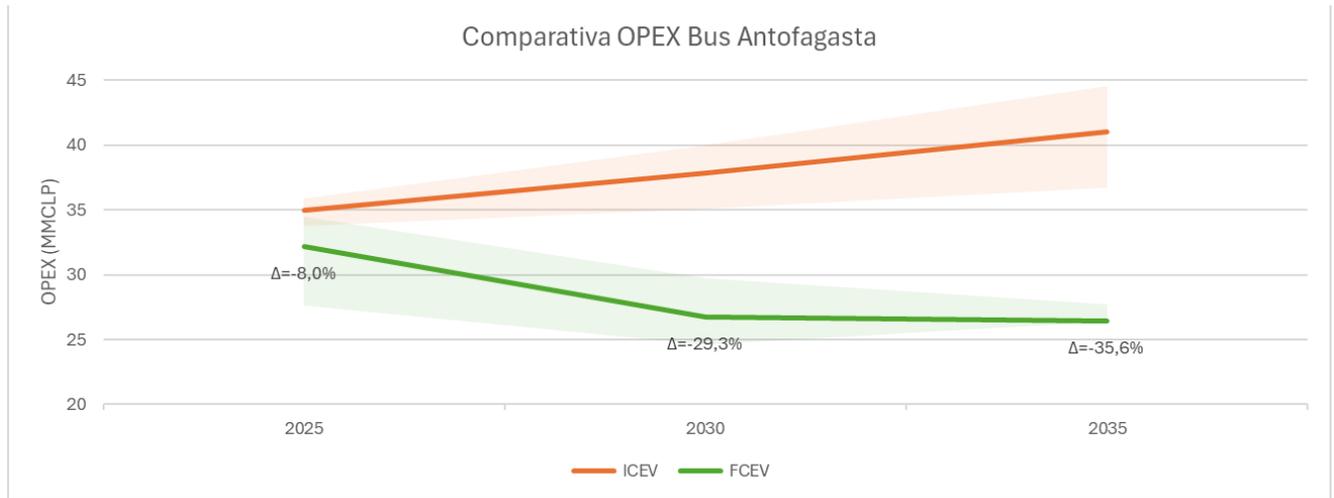


Figura 6-58: Comparativa OPEX de la Ruta 3.

Fuente: Elaboración propia

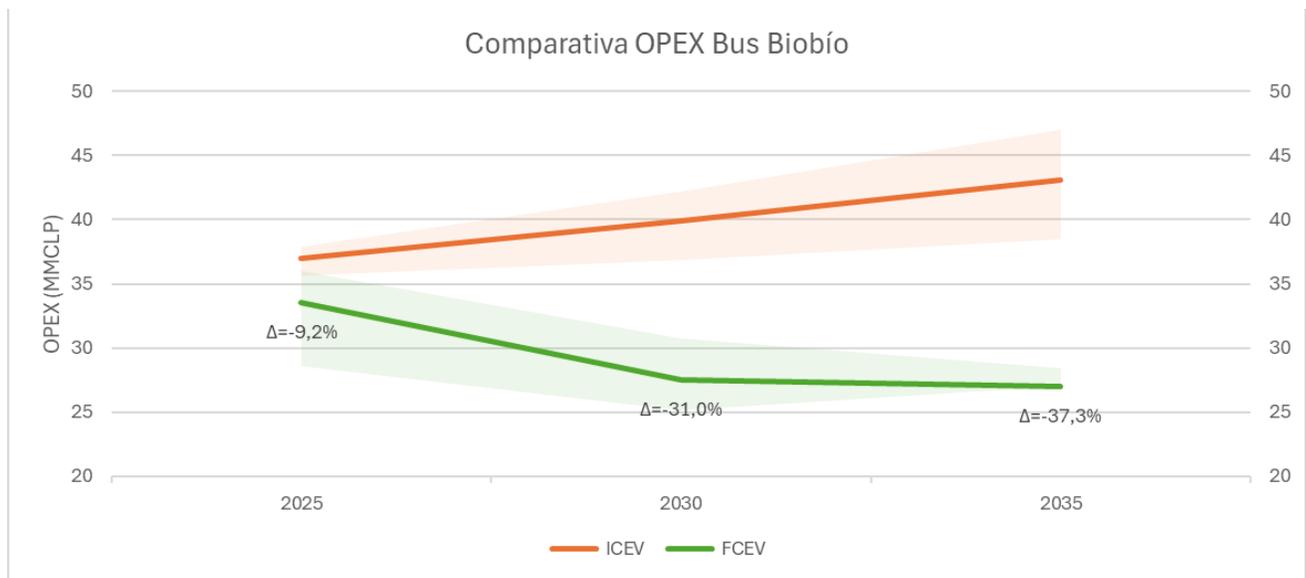


Figura 6-59: Comparativa OPEX de la Ruta 4.

Fuente: Elaboración propia

Se observa en las figuras anteriores que el costo operativo promedio anual de los vehículos con Fuel Cell es, hoy en día, más competitivo que el de un vehículo a diésel y que, con los valores proyectados del costo del hidrógeno, se espera que la competitividad mejore con los años. Se observa, por ejemplo, que para 2035 el costo operacional podría llegar hasta un 44.8% menos que el costo de operar un vehículo a diésel, lo que hace de los vehículos a Fuel Cell una opción atractiva con respecto a los vehículos a diésel. Se observa también que el OPEX mejora más con el tiempo en el caso de los camiones que en el caso de los buses, lo cual explica parcialmente el hecho de que, al reducir el nivel de inversión de los vehículos a Fuel Cell, los camiones se vuelvan competitivos antes que los buses.

6.6.5 Subsidio de la Inversión

Ante la inviabilidad económica que presentan los vehículos de transporte pesado propulsados a FuelCell estudiados en el presente documento, cabe revisar la posibilidad de un mecanismo que haga competitiva esta tecnología hoy en día. Con esto en mente, se presenta a continuación una breve revisión del nivel de subsidio que se requiere en cada caso para que la tecnología logre equiparar los costos de un vehículo diésel, las figuras a continuación presentan una línea horizontal que corresponde al TCO promedio (considerando las variaciones regionales) del vehículo a diésel, mientras que el resto de las líneas muestra cómo se comporta el TCO de los vehículos a Fuel Cell para un nivel de subsidio en particular.

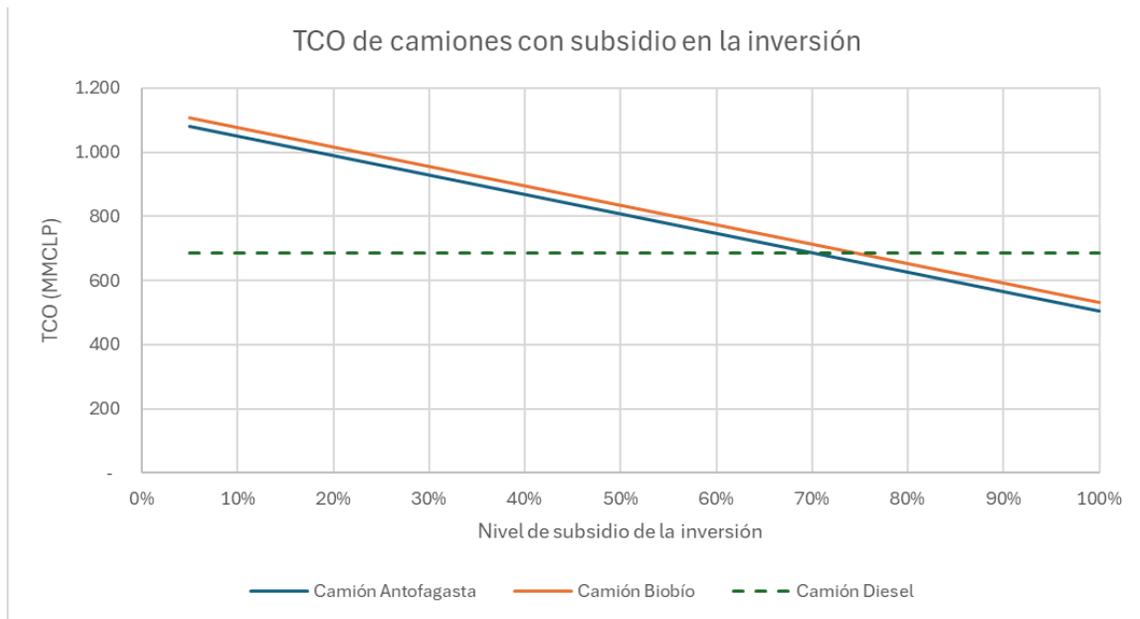


Figura 6-60: Efecto del subsidio en la inversión en el TCO de camiones estudiados.

Fuente: Elaboración propia

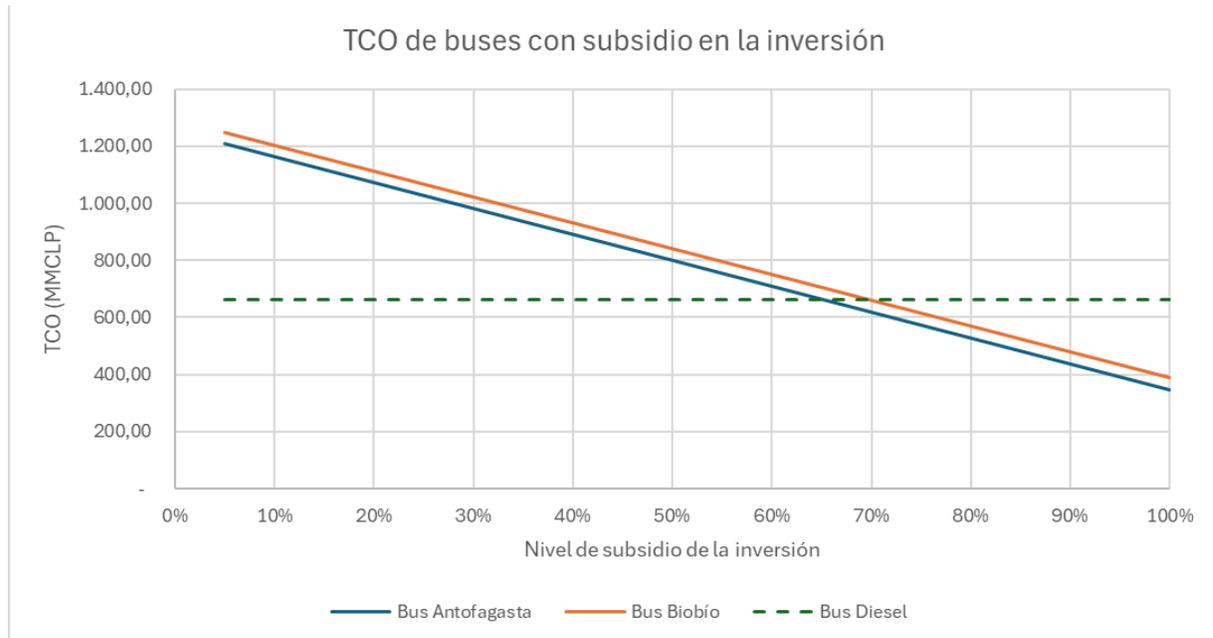


Figura 6-61: Efecto del subsidio en la inversión en el TCO de buses estudiados.

Fuente: Elaboración propia

De las figuras se concluye que, hoy en día, se requiere de un nivel de subsidio de aproximadamente el 75% en el caso de los camiones y de un 70% en el caso de los buses para equiparar los niveles de costos de sus contrapartes a diésel. Estos porcentajes significan un total de 454 MMCLP y 634 MMCLP, respectivamente. Estos números podrían contemplarse a futuro para algún programa de financiamiento público que incentive este tipo de tecnologías.

6.6.6 Análisis Comparativo Entre Regiones

De los resultados presentados en los capítulos anteriores, se puede apreciar que los consumos energéticos tanto de diésel como de hidrógeno en la región de Antofagasta son considerablemente mayores que los consumos en Biobío, tanto en transporte de carga como de pasajeros. Esto se debe claramente a que las rutas son más largas (mayor cantidad de kilómetros recorridos) además de poseer rutas con mayor pendiente que evidentemente deberían generar un mayor consumo de energía.

6.6.6.1 Análisis Comparativo Entre Regiones: Buses

Se aprecia que los buses a hidrógeno no tienen un desempeño energético significativamente diferente al de los buses a diésel, ya que en ambos tipos de vehículos la variación en el rendimiento está en torno al 25% menos en Antofagasta que en el trayecto de la región del Biobío.

Por otro lado, se observa una diferencia significativa en el rendimiento del vehículo entre las dos regiones, teniendo un menor rendimiento en Biobío en comparación con el de la región de Antofagasta. Esta situación a priori es inesperada en consideración que la región de Antofagasta tiene rutas con mucha mayor pendiente que las de Biobío lo que habría implicado preliminarmente mayor consumo de combustible. Sin embargo, al analizar las curvas de velocidad de los vehículos en la ruta, se aprecia que la ruta de Biobío posee mayores variaciones de

velocidad, lo que provocaría el mayor consumo específico de los buses en comparación con la región de Antofagasta. Aunque esta podría ser una buena explicación del mayor rendimiento energético de los buses en el norte, también esta variación se podría deber al efecto del viento que, como se apreció en la Figura 6-48 y Figura 6-49, tiene un impacto mucho más significativo en los buses que en los camiones de carga. Esta variación en el rendimiento tiene su repercusión en el TCO, en donde se observa que los buses de la región del BioBio poseen un TCO levemente superior al observado en los buses de Antofagasta.

Con respecto a la capacidad se observa que, si bien poseen la potencia suficiente para sortear el recorrido que realizan sus contrapartes, la autonomía que poseen los vehículos estudiados no les es suficiente para completar los trayectos. Por un lado, en el caso del recorrido de Antofagasta-Calama, se requiere una autonomía de 568 km y el FCEV tipo para este recorrido indica una autonomía de 482 km, teniendo este que repostar combustible en un destino antes de retornar a su punto de partida. Por otro lado, la ruta en la región del Biobío se estudió con un recorrido alterado para realizar una trayectoria dentro de la región. Recordando que la ruta original de este trayecto es de Concepción a Santiago, se requeriría una autonomía de aproximadamente 530 km, superando los 482 km que indica la ficha técnica del fabricante. Con esto se entiende que, al menos el bus estudiado, no dispone de la autonomía suficiente para completar el servicio requerido.

6.6.6.2 Análisis Comparativo Entre Regiones: Camiones

En primera instancia, es posible observar que la implementación de camiones a hidrógeno en ambas regiones es técnicamente factible, pues tanto la potencia como la autonomía son compatibles con las condiciones de los trayectos estudiados, por lo que estos vehículos podrían reemplazar técnicamente a sus contrapartes a diésel.

Al observar los rendimientos o consumos específicos por kilómetro de la Figura 6-50 y Figura 6-51, se puede apreciar que prácticamente no hay diferencia en el rendimiento de los camiones de carga entre regiones, tanto en consumo de diésel como en consumo de hidrógeno, observándose valores de aproximadamente 8,5 kg de H₂ cada 100 km de recorrido. Estos valores además se condicen con los valores de rendimiento de camiones FCEV internacionales, como se observó en el capítulo 2.5.7.1.

En términos de TCO, no se aprecia gran diferencia entre las regiones, esto debido a que, al poseer rendimientos similares y un costo de inversión equivalente, los valores de TCO tienden a mantenerse iguales. Esta explicación también podría apoyarse en el hecho de que los camiones de carga no tienen grandes variaciones de rendimiento ante las condiciones meteorológicas, ya que este tipo de vehículos se ve afectado mucho menos por el viento que los buses de pasajeros.

7 Conclusiones

7.1 Introducción

El estudio sobre la implementación del hidrógeno verde en el transporte en Chile ha revelado un panorama complejo que abarca tanto oportunidades como desafíos significativos. A pesar de la creciente tendencia global hacia el uso de esta tecnología ambientalmente sostenible, se identifican brechas críticas y barreras que limitan su adopción en el contexto nacional. La carencia de un marco regulatorio claro, junto con la falta de infraestructura adecuada y el alto costo de los vehículos a hidrógeno, plantean un obstáculo considerable para su viabilidad técnica y su competitividad económica. Sin embargo, se perciben áreas de mejora que, si se abordan adecuadamente, podrían facilitar la transición hacia un sistema de transporte más limpio y sostenible, siempre y cuando se generen las economías de escala globales necesarias y se recorra la curva de experiencia pendiente de forma acelerada.

A efectos de disponibilidad de vehículos y tecnología, se ha identificado una oferta creciente de vehículos pesados de distintos fabricantes y proveedores, tanto de buses como de camiones y de sistemas de acumulación y recarga, aunque en general su producción en serie es todavía limitada y sus costos efectivos demasiado elevados para ser competitivos.

Pero además de la limitante de los costos de inversión, persisten diversas barreras que deben superarse a nivel país para lograr una adopción que vaya más allá de los pilotos. Además de los aspectos técnicos, existen condiciones estructurales que deben ser abordadas para una implementación a mayor escala. Una de las principales brechas identificadas es la falta de infraestructura adecuada para el almacenamiento y transporte de hidrógeno, lo que dificulta establecer una red de suministro sólida que permita la operación continua y eficiente de vehículos a hidrógeno. Esta limitación compromete la escalabilidad de la tecnología y su despliegue en territorios más extensos.

Por otro lado, la regulación actual presenta vacíos importantes. El hidrógeno sigue siendo tratado normativamente como una sustancia peligrosa, sin un marco específico que atienda sus particularidades como vector energético para el transporte. Esta falta de regulación adecuada no solo genera incertidumbre para los inversionistas, sino que también ralentiza el desarrollo de proyectos al no contar con lineamientos técnicos claros ni procedimientos administrativos expeditos.

A esto se suma la necesidad de contar con capital humano capacitado para operar, mantener y gestionar esta nueva tecnología. La transición hacia el hidrógeno implica un rediseño completo de procesos técnicos y operativos. Se requieren programas de formación que preparen a conductores, mecánicos y gestores del transporte para enfrentar los nuevos desafíos que implica el uso de hidrógeno como combustible.

7.2 Transporte de Carga

En el transporte de carga, se identificó un avance acelerado en el desarrollo de camiones a hidrógeno a nivel global, aunque, como se indicó antes, su producción en serie aún es limitada. Pero, por otro lado, la posibilidad de personalizar estos vehículos según las necesidades de cada sector les otorga un alto potencial, especialmente en aplicaciones como la minería. En Chile, se encuentran operativos dos pilotos de camiones a hidrógeno, impulsados por las empresas Walmart y Sotraser.

El análisis técnico económico realizado para dos rutas reales en las regiones de Antofagasta y Biobío, mediante la simulación de un modelo matemático desarrollados ad-hoc, mostró que los camiones a hidrógeno cumplen



con los requerimientos operacionales sin necesidad de modificaciones sustanciales en la infraestructura, gracias especialmente a que su autonomía es similar a la de los camiones diésel (1.500km del QHM FCEV 44-1000 por 1.200km del Volvo FM). Esto confirma su viabilidad técnica en ambos territorios .

Además de la viabilidad operativa, los resultados de las simulaciones indican que los camiones de hidrógeno consumen cerca de un 13% menos de energía que los diésel para los mismos recorridos. Esta mejor eficiencia es tal que incluso con los costos actuales del H2V logra ahorros de OPEX de entre el 7% y el 8% que, con la reducción prevista del costo del H2V hasta 2035, podrían superar el 40%. Aun así, todas estas ventajas se ven opacadas por el alto costo de inversión de la tecnología, que hace que los TCO de los camiones de H2V no logren competir con los diésel ni tan siquiera en 2035 cuando, según la curva nominal de reducción de costos de la tecnología, todavía sería del orden de un 15% más costoso un FCEV con H2V que un ICE con diésel. Solo si se logra una reducción del costo de la tecnología superior al 50% se podría esperar que los camiones a hidrógeno fueran competitivos hacia el 2035, o incluso hacia el 2030 en escenarios más optimistas.

En este contexto, resulta fundamental no perder de vista el potencial de desarrollo que presenta esta tecnología, especialmente en sectores como la minería, donde las condiciones operativas y los volúmenes de carga hacen factible la incorporación temprana de camiones a hidrógeno. Los pilotos actualmente en operación demuestran que existe capacidad técnica instalada y un interés creciente en el país, lo que puede facilitar la expansión de esta alternativa en los próximos años.

7.3 Transporte de Pasajeros

En el caso de los buses, se identificó también una oferta creciente y avances en eficiencia, autonomía y tiempos de recarga, consolidándolos como una alternativa viable frente al diésel. Sin embargo, igual que con los camiones, su alto costo de adquisición sigue siendo una barrera para su adopción masiva. A pesar de esto, en Chile ya opera un caso piloto de bus a hidrógeno desarrollado en Chile, liderado por Anglo American, Colbún y Reborn Electric Motors, con financiamiento de CORFO.

Mediante el análisis de rutas reales en Antofagasta y Biobío, se observó que, a diferencia del caso de carga, buses a hidrógeno analizados no tienen autonomía suficiente para completar viajes de ida y regreso de las rutas seleccionadas sin repostar, lo cual representa una limitación técnica importante en trayectos interurbanos. Esta barrera podría superarse con la implementación de hidrolineras en puntos estratégicos del país, permitiendo así su uso en rutas de mayor distancia. Mientras tanto, su aplicación en el transporte intraurbano aparece más adecuada, dado que las distancias recorridas son más reducidas y la infraestructura de recarga podría ser gestionada de mejor manera.

A pesar de esta falta de viabilidad operativa, los resultados de las simulaciones indican que los buses de hidrógeno consumen cerca de un 25% menos de energía que los buses a diésel para los mismos recorridos, logrando ahorros de OPEX de hasta un 9% en 2025, en base a los precios de hidrógeno considerados, que aún no son fáciles de alcanzar debido a la falta de oferta de hidrógeno que se espera cambie en el corto plazo. Aun así, de nuevo el alto costo de inversión inviabiliza económicamente estas opciones, dado que ni en 2035 se logran TCO inferiores al 140% de los de los diésel, excepto en el caso en que se logren reducciones de costo de la tecnología superiores al 50%, que lograrían la paridad con el diésel recién en 2033 en el mejor de los escenarios.

Recalcar de este análisis el distinto requerimiento de infraestructura requerida para el despliegue de buses urbanos o interurbanos, debido a la limitada autonomía de los segundos.

7.4 Resultados

Los análisis de caso revelan diferencias clave en la viabilidad técnica de los vehículos a hidrógeno en función de su aplicación específica, pero independiente de la viabilidad técnica, no se observa viabilidad económica en el

corto ni el mediano plazo en ninguno de los casos. Si bien los vehículos a hidrógeno presentan una eficiencia energética superior en términos de conversión de energía en todos los casos, esta ventaja se ve contrarrestada por el alto costo de adquisición de los vehículos. A pesar de que los costos operacionales pueden ser competitivos en ciertos escenarios, el costo total de propiedad (TCO) sigue siendo significativamente mayor que el de los vehículos diésel, lo que deja en una desventaja competitiva a los vehículos con pilas de combustible alimentados con hidrógeno verde.

Tal como se ha observado, para que la implementación de esta tecnología sea económicamente viable, es imprescindible una reducción sustancial en los costos de inversión, lo que dependerá en gran medida de avances tecnológicos y de las economías de escala que podrían suceder a lo largo de los años, como se espera que ocurra dentro de la próxima década. Sin embargo, la política chilena, aun pudiendo aportar, no podrá jugar un rol determinante en este aspecto, como el que sí podrá jugar en el costo del H2V. Para la situación actual, la única forma de lograr que los vehículos de carga y de transporte de pasajeros a hidrógeno sean competitivos frente a los vehículos a diésel, es mediante subsidios a la adquisición de los vehículos, que deberían ser del orden del 75% del costo de inversión, para que los FCEV sean competitivos en 2025.

Esto refuerza la necesidad de políticas públicas que no solo aborden los aspectos normativos e infraestructurales, sino que también consideren incentivos económicos claros para fomentar la inversión privada si se quiere lograr que sucedan cosas e incentivar una economía del hidrógeno verde. La alta eficiencia energética de los camiones a hidrógeno representa una ventaja competitiva en el largo plazo, pero los elevados costos iniciales requieren ser mitigados mediante subsidios y apoyos estatales que aceleren la adopción tecnológica. Pero hay que tomar en cuenta que esos subsidios del 75% se sitúan entre los 450 MMCLP y los 650 MMCLP, según el vehículo considerado, lo que conduce a plantearse cuál sería el retorno país de una línea de subsidios de esta magnitud para una tecnología que se encuentra tan lejos de la competitividad, considerando que, muy probablemente la andadura de su curva de experiencia no dependerá del volumen de vehículos desplegados en Chile.

Es importante destacar que, dado que se trata de rutas concretas con vehículos concretos, los resultados de los estudios de caso no son en absoluto extrapolables de forma generalizada y sistemática. Aun así, comparando con los otros estudios tanto nacionales como internacionales analizados en este trabajo, los resultados son muy similares, de lo que se puede inferir que a día de hoy es muy probable que en aplicaciones de transporte pesado los FCEV no sean competitivos con los ICEV.

Finalmente, es importante recordar que, además de los factores técnicos y económicos, existen barreras institucionales, regulatorias y de infraestructura, así como desafíos asociados al capital humano y a la logística del abastecimiento de hidrógeno. Por ello, se requiere un enfoque integral de política pública que permita superar estas brechas de manera paralela, incluyendo mejoras en la disponibilidad de servicios postventa de fabricantes internacionales, además de una regulación específica que acompañe el despliegue del hidrógeno como vector energético.

Y con todo lo anterior, se dibujan tres caminos que deben ser recorridos, tres condiciones *sine qua non* para lograr la viabilidad de esta tecnología y el consiguiente desplazamiento de los combustibles fósiles. En lo más concreto, la política pública integral de eliminación de barreras regulatorias, desarrollo de un marco legal, dotación de infraestructura de recarga y establecimiento de capacidades, incluyendo también el apoyo a la existencia de proyectos piloto. En un plano más estratégico, el desarrollo país de la economía del hidrógeno verde, incentivando generación y demanda para lograr reducir el costo del H2V en el mercado. Y, finalmente, lograr reducir los costos de la tecnología, camino en el que el volumen del mercado mundial juega un papel clave y en el que Chile tiene poco que aportar como comprador, pero quizás pueda tener un rol como desarrollador, dado el interés estratégico que tiene para el país el desarrollo de la economía del H2V.

8 Recomendaciones

Para impulsar el uso del hidrógeno en el transporte, se requiere un marco regulatorio sólido, infraestructura adecuada e incentivos que faciliten su adopción.

A continuación, se presentan las principales recomendaciones para su desarrollo en Chile.

- En primer lugar, se plantea la necesidad de desarrollar un marco regulatorio específico que no solo considere la homologación de vehículos a hidrógeno, sino que también aborde aspectos vinculados a la infraestructura de carga y a sistemas auxiliares. En este sentido, resulta urgente coordinar acciones entre el gobierno, la industria y el mundo académico, a fin de establecer un contexto normativo que favorezca la adopción del hidrógeno verde como una alternativa viable y sostenible.
- Es fundamental avanzar hacia una regulación específica para el hidrógeno como combustible, que considere sus particularidades técnicas y operativas, diferenciándose de la normativa general para sustancias peligrosas. Esta debe incluir estándares de seguridad y eficiencia para el almacenamiento, transporte y distribución, así como para la infraestructura asociada. La falta de normativas claras limita la expansión de proyectos o pilotos y genera incertidumbre, por lo que se recomienda su elaboración conjunta entre autoridades, expertos técnicos y representantes del sector productivo y académico.
- En paralelo, para potenciar el uso de buses y camiones a hidrógeno, es clave reforzar la infraestructura de abastecimiento y asegurar una red de suministro confiable que permita su operación eficiente. Junto con esto, se requiere implementar incentivos económicos y mecanismos de financiamiento que reduzcan la brecha de costos frente a las tecnologías convencionales, facilitando su inserción en el mercado. Desde el plano técnico, se vuelve esencial continuar con la ejecución y evaluación de proyectos piloto que permitan validar el rendimiento de esta tecnología en distintos entornos, así como fortalecer la colaboración con fabricantes y proveedores internacionales, promoviendo acuerdos que reduzcan barreras de acceso y comercialización.
- Asimismo, se subraya la importancia de implementar programas de capacitación y formación técnica para preparar al capital humano frente a los desafíos operacionales, de mantenimiento y gestión de flotas a hidrógeno. Esta dimensión formativa debiera incluir también iniciativas de educación y sensibilización pública, orientadas a mejorar la aceptación social del hidrógeno como fuente energética segura y limpia.
- Por otra parte, desde un punto de vista estrictamente económico, los resultados del análisis muestran que no es rentable sustituir la actual flota diésel por vehículos a hidrógeno, al menos en un horizonte de cinco años, a menos que se produzca una disminución drástica en el costo tanto de los vehículos como del hidrógeno verde como combustible. Aun así, si existe voluntad política de avanzar en esta línea por razones estratégicas, los proyectos piloto pueden ser una herramienta útil para validar la tecnología, identificar barreras logísticas y económicas, y generar impactos sociales y mediáticos que faciliten su expansión futura. En esta línea, resulta clave establecer mecanismos de evaluación continua de los pilotos que se implementen, lo que permitirá extraer aprendizajes y realizar ajustes estratégicos oportunos.
- En este contexto, se proponen dos intervenciones piloto. La primera consiste en un programa de buses urbanos a hidrógeno en la ciudad de Concepción, Región del Biobío. Esta ciudad, por su alta densidad poblacional, representa un entorno urbano exigente ideal para evaluar el funcionamiento de estos vehículos. Además, el impacto social y mediático sería significativo al involucrar a numerosos usuarios



diarios. Un elemento clave que respalda esta elección es la existencia de la hoja de ruta H2V Biobío, que facilitaría el abastecimiento del combustible y permitiría alinear el piloto con los planes energéticos regionales.

- De forma complementaria, se plantea una segunda propuesta centrada en un piloto de transporte de carga en la Región de Antofagasta, zona caracterizada por una intensa actividad minera e industrial, sectores que dependen fuertemente del transporte pesado. Este contexto representa una oportunidad clave para introducir esta tecnología en un entorno con alta visibilidad empresarial. A ello se suma que Antofagasta es una de las regiones donde se proyecta un fuerte desarrollo en la producción de hidrógeno verde, lo que permitiría evaluar la cadena completa de suministro y consumo en condiciones reales.
- Finalmente, se considera relevante ampliar este estudio incluyendo una comparación con vehículos eléctricos, ya que es posible que en el futuro los vehículos a hidrógeno alcancen niveles de costo que los hagan competitivos frente a tecnologías tradicionales. Sin embargo, es importante también determinar si estos avances serán suficientes para superar la posición actual de los vehículos eléctricos, cuya tecnología se encuentra más consolidada. Desde el punto de vista técnico, los vehículos de carga a hidrógeno presentan ventajas como un menor peso respecto a los eléctricos con baterías grandes, lo que resulta relevante considerando las normativas de peso vigentes para las carreteras ya construidas. Además, su capacidad de carga rápida representa una ventaja significativa para vehículos de operación continua o para aquellos que recorren largas distancias, una condición común dadas las características geográficas del país. Esta ampliación del estudio debería poder complementarse con los objetivos planteados en la política energética nacional.

9 Anexos

9.1 Vehículos a Hidrógeno

9.1.1 Precios referenciales camiones diésel

A continuación, se entregan algunos precios de marcas de camiones Diésel más comunes para tener como referencia. Todos los camiones cotizados son norma de emisiones Euro V.

Tabla 9-1: Precios Referenciales Tractocamiones Diésel

Marca	Modelo	ejes	Tracción	Largo (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Potencia	Cilindrada (cc)	Tara en vacío (kg)	Carga útil (kg)	Peso bruto vehicular (kg)	Peso bruto vehicular combinado (kg)	Depósito combustible (L)	Precio con IVA \$
MERCEDES-BENZ	NEW ACTROS 2045 LS/36 4X2 STREAM 4.5 SEG RET	2	4X2	5,9	4,1	2,4	330 kw/ 449 CV	12.809	7.245	12.855	20.100	45.000	535	143.133.200
	NEW ACTROS 2548 LS/33 6X2 STREAM 4.5 SEG RET	3	6X2	6,9	4,1	2,4	350 kw/ 476 CV	12.809	8.540	16.460	25.000	45.000	730	53.521.900
	NEW ACTROS 2548 LS/36 6X2 STREAM 4.5 SEG RET	3	6X2	7,2	3,7	2,4	351 kw/ 476 CV	12.809	8.910	17.900	26.810	45.000	535	153.521.900
	NEW ACTROS 2648 LS/36 6X4 STREAM 4.5 SEG RET	3	6X4	7,2	4,1	2,4	352 kw/ 476 CV	12.809	10.143	16.975	27.118	45.000	535	158.139.100
	AXOR 2041 LS 4X2 3600	2	4X2	5,8		2,6	401 CV/433 HP	12.000	7.475	12.625	20.100	45.000	590	118.892.900
	AXOR 2541 LS 6X2 3100 T.BAJO	3	6X2	6,5			401 CV/433 HP	12.000	8.939	17.161	26.100		650	132.744.500
FREIGHTLINER	TRACTO NEW CA116 6X4 60K DD13 445 DT12 SEG	3	6X4	7,8	3,4		445 HP	12.800	8.245	18.996	27.241		760	173.145.000
	TRACTO NEW CA116 6X4 60K DD13 505 DT12 SEG	3	6X4	8,3	4,1		375 kw/ 505 HP	12.800	8.547	18.966	27.513		908	175.453.600
Volkswagen	CONSTELLATION 19.360 LR 3560MM AZ12	2	4X2	6,0	2,9	2,5	265 CV	8.900	6.630	9.370	16000	45000	550	96.033.000
	CONSTELLATION 25.360 HR 3300MM AZ12	3	6X2	7,0	3,3	2,5	266 CV	8.900	8.381	14.619	23000	48500	615	107.564.796
	CONSTELLATION 26.420 HR 3300MM AZ12	3	6X4	7,0	3,4	2,5	420 CV	8.900	8.715	14.285	23000	63000	615	131.514.230

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9-2: Precios Referenciales Camiones Diésel

Marca	Modelo	ejes	Tracción	Largo (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Potencia	Cilindrada (cc)	Tara en vacío (kg)	Carga útil (kg)	Peso bruto vehicular (kg)	Peso bruto vehicular combinado (kg)	Depósito combustible (L)	Precio con IVA \$
Chevrolet	NKR512	2	4X2	4,7	2,1	1,8	124 HP	2.999	2.045	2.655	4.700		75	31.118.500
	NKR612	2	4X2	6,0	2,2	1,8	124 HP	2.999	2.095	3.605	5.700		100	31.285.100
	NPR715	2	4X2	6,6	2,3	2,0	155 HP	5.193	2.490	4.510	7.000		100	35.331.100
	NPR816	2	4X2	6,6	2,3	2,0	155 HP	5.193	2.540	4.960	7.500		100	35.331.100
	NPR816AMT	2	4X2	6,6	2,3	2,0	155 HP	5.193	2.570	4.930	7.500		100	39.972.100
	NQR919	2	4X2	7,4	2,3	2,0	190 HP	5.193	2.960	6.540	9.500		140	41.150.200
	NPR816DC	2	4X2	6,6	2,3	2,0	155 HP	5.193	3.025	4.475	7.500		100	40.043.500
	FRR1119	2	4X2	7,9	2,6	2,2	190 HP	5.193	3.345	7.655	11.000		200	50.003.800
	FRR1119AMT	2	4X2	7,9	2,6	2,2	190 HP	5.193	3.405	7.595	11.000		200	54.168.800
	NPS816 4x4	2	4X2	6,0	2,5	2,0	155 HP	5.193	2.860	4.640	7.500		100	54.085.500
	FTR1524	2	4X2	8,5	2,8	2,4	240 HP	7.790	4.925	10.075	15.000		200	65.676.100
	FVR1724	2	4X2	8,5	2,8	2,4	240 HP	7.790	5.360	11.640	17.000		200	67.699.100
	FTR1524AMT	2	4X2	8,5	2,9	2,4	240 HP	7.790	4.990	10.010	15.000		200	67.699.100
FVR1826	2	4X2	9,3	2,8	2,4	260 HP	7.790	5.760	12.240	18.000		400	71.269.100	
FVR1724AT	2	4X2	8,5	2,9	2,4	240 HP	7.790	5.490	11.510	17.000		200	79.361.100	
FUSO	Canter 413 Euro V	2	4X2	4,6	2,1	1,7	130 CV	2.998	1.865	1.635	3.500		70	26.775.000
	Canter 413 Euro V (FULL)	2	4X2	4,6	2,1	1,7	130 CV	2.998	1.865	1.635	3.500		70	27.965.000
	Canter 413 Euro V DUONIC	2	4X2	4,6	2,1	1,7	130 CV	2.998	1.865	1.635	3.500		70	29.155.000
	Canter 413 Euro V DUONIC (FULL)	2	4X2	4,6	2,1	1,7	130 CV	2.998	1.865	1.635	3.500		70	30.345.000
	Canter 513 Euro V	2	4X2	5,0	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.000	3.000	5.000		70	26.061.000
	Canter 513 Euro V (FULL)	2	4X2	5,0	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.000	3.000	5.000		70	27.251.000
	Canter 513 Euro V DUONIC	2	4X2	5,0	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.000	3.000	5.000		70	28.441.000
	Canter 513 Euro V DUONIC (FULL)	2	4X2	5,0	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.000	3.000	5.000		70	29.631.000
	Canter 613 Euro V	2	4X2	5,8	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.070	3.630	5.700		100	28.560.000
	Canter 613 Euro V (FULL)	2	4X2	5,8	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.070	3.630	5.700		100	29.750.000
	Canter 613 Euro V DUONIC	2	4X2	5,8	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.070	3.630	5.700		100	30.702.000
	Canter 613 Euro V DUONIC (FULL)	2	4X2	5,8	2,1	1,9	130 CV	2.998	2.070	3.630	5.700		100	32.487.000
Canter 615 4X4 Euro V (FULL)	2	4X4	5,9	2,5	2,0	150 CV	2.998	2.655	3.345	6.000		100	47.005.000	

Marca	Modelo	ejes	Tracción	Largo (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Potencia	Cilindrada (cc)	Tara en vacío (kg)	Carga útil (kg)	Peso bruto vehicular (kg)	Peso bruto vehicular combinado (kg)	Depósito combustible (L)	Precio con IVA \$
Fiat	Canter 715 Euro V	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.370	4.130	6.500		100	28.441.000
	Canter 715 Euro V (FULL)	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.370	4.130	6.500		100	29.631.000
	Canter 715 Euro V DUONIC	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.370	4.130	6.500		100	30.821.000
	Canter 715 Euro V DUONIC (FULL)	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.370	4.130	6.500		100	32.011.000
	Canter 715 DC Euro V	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.590	3.910	6.500		100	33.677.000
	Canter 715 DC Euro V (FULL)	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.590	3.910	6.500		100	35.462.000
	Canter 715 DC Euro V DUONIC	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.590	3.910	6.500		100	35.462.000
	Canter 715 DC Euro V DUONIC (FULL)	2	4X2	6,7	2,2	2,0	150 CV	2.998	2.590	3.910	6.500		100	37.723.000
	Canter 815 Euro V	2	4X2	7,2	2,2	2,1	150 CV	2.998	2.500	5.000	7.500		170	33.320.000
	Canter 815 Euro V (FULL)	2	4X2	7,2	2,2	2,1	150 CV	2.998	2.500	5.000	7.500		170	34.510.000
	Canter 815 Euro V DUONIC	2	4X2	7,2	2,2	2,1	150 CV	2.998	2.500	5.000	7.500		170	35.105.000
	Canter 815 Euro V DUONIC (FULL)	2	4X2	7,2	2,2	2,1	150 CV	2.998	2.500	5.000	7.500		170	36.771.000
	Canter 915 Euro V	2	4X2	7,2	2,2	2,1	150 CV	2.998	2.550	6.000	8.550		170	35.581.000
	Canter 915 Euro V (FULL)	2	4X2	7,2	2,2	2,1	150 CV	2.998	2.550	6.000	8.550		170	37.128.000
	Fuso 1017 4x2 Euro V	2	4X2	7,5	2,4	2,2	170 CV	3.907	3.355	6.245	9.600		200	33.796.000
	Fuso 1017 4x2 Euro V (FULL)	2	4X2	7,5	2,4	2,2	170 CV	3.907	3.355	6.245	9.600		200	34.986.000
	Fuso 1217 4x2 Euro V	2	4X2	8,5	2,4	2,2	170 CV	3.907	3.990	8.000	11.990		200	42.245.000
Fuso 1217 4x2 Euro V (FULL)	2	4X2	8,5	2,4	2,2	170 CV	3.907	3.990	8.000	11.990		200	43.435.000	
Fuso 1828 4x2 Euro V (FULL)	2	4X2	9,1	3,0	2,5	285 CV	6.370	6.225	11.775	18.000		255	58.905.000	
Fuso 1828 6x2 Euro V (FULL)	3	6X2	10,2	2,5	2,3	207 kW	7.545			18.000	20.000	200	70.210.000	
Volkswagen	DELIVERY 6.160 4000 MM MT6 -BA S/C	2	4X2	6,9	2,4	2,1	156 CV	2.800	2.419	3.881	6.300		80	32.832.100
	DELIVERY 9.170 4600 MM MT6 PRIME	2	4X2	8,5	2,4	2,1	165 CV	3.800	3.050	5.750	8.800		150	41.638.100
	DELIVERY 9.170 4600 MM AZ6 PRIME	2	4X2	8,5	2,4	2,1	165 CV	3.800	3.050	5.750	8.800		150	42.114.100
	DELIVERY 11.180 4600MM AZ6 PRIME	2	4X2	8,5	2,5	2,1	175 CV	3.800	3.400	7.300	10.700	10.700	150	52.598.000
	DELIVERY 11.180 4600MM MT6 PRIME	2	4X2	8,5	2,5	2,1	175 CV	3.800	3.400	7.300	10.700	10.700	150	51.408.000
	DELIVERY 11.180 4600 MT6 4X4	2	4X4	6,5	2,6	2,1	175 CV	3.800	3.770	6.930	10.700	10.700	150	79.254.000
	CONSTELLATION 14.190 DC 4800MM MT6	2	4X2	8,6	2,8	2,5	137 CV	4.580	4.850	9.150	14.000	23.000	275	66.045.000
	CONSTELLATION 17.230 DC 4800MM MT6 AC	2	4X2	8,6	2,9	2,5	166 CV	4.580	5.330	10.670	16.000	27.000	275	69.853.000
	CONSTELLATION 17.280 LR 5207 MM AZ10	2	4X2	9,0	2,9	2,5	275 CV	6.871	5.745	11.355	17.100	35.000	275	78.302.000



Marca	Modelo	ejes	Tracción	Largo (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Potencia	Cilindrada (cc)	Tara en vacío (kg)	Carga útil (kg)	Peso bruto vehicular (kg)	Peso bruto vehicular combinado (kg)	Depósito combustible (L)	Precio con IVA \$
	CONSTELLATION 17.280 LR 4800 MM MT9 AC	2	4X2	8,6	2,9	2,5	275 CV	6.871	5.455	11.645	17.100	35.000	275	74.613.000
	CONSTELLATION 17.280 DC 4800 MM MT9 AC	2	4X2	8,6	2,9	2,5	275 CV	6.871	5.400	11.700	17.100	35.000	275	68.901.000
	CONSTELLATION 17.280 DC 4800MM AZ10	2	4X2	8,6	2,9	2,5	275 CV	6.871	5.400	11.700	17.100	35.000	275	79.373.000
	CONSTELLATION 17.280 DC 4340MM AT6	2	4X2	8,0	2,9	2,5	275 CV	6.871	5.350	11.750	17.100	35.000	275	91.868.000
	CONSTELLATION 17.330 HR 5207 MM MT16	2	4X2	9,0	3,3	2,5	334 CV	8.900	6.530	9.470	16.000	45.000	550	81.277.000
	CONSTELLATION 24.280 LR 5207MM MT9	3	6X2	9,8	2,9	2,5	205 CV	6.871	6.640	16.360	23.000	35.000	550	87.227.000
	CONSTELLATION 24.280 LR 5207MM MT 8X2	3	6X2	9,8	2,9	2,5	205 CV	6.871	6.640	16.360	23.000	35.000	550	87.227.000
	CONSTELLATION 24.280 LR 5207MM AZ10	3	6X2	9,8	2,9	2,5	205 CV	6.871	6.640	16.360	23.000	35.000	550	89.131.000
	CONSTELLATION 24.280 LR 4800 MM MT9 AC	3	6X2	9,8	2,9	2,5	205 CV	6.871	6.640	16.360	23.000	35.000	550	84.133.000
	CONSTELLATION 24.280 DC 5207MM AZ10	3	6X2	9,8	2,9	2,5	205 CV	6.871	6.840	16.160	23.000	35.000	550	86.632.000
	CONSTELLATION 24.280 DC 4800 MM MT9	3	6X2	9,8	2,9	2,5	205 CV	6.871	6.840	16.160	23.000	35.000	550	83.181.000
	CONSTELLATION 24330 HR 5207 MM AZ12	3	6X2	9,8	3,3	2,5	246 CV	8.900	7.810	15.190	23.000	45.000	550	92.463.000
	CONSTELLATION 24.330 LR 5207MM AZ12	3	6X2	9,8	2,9	2,5	246 CV	8.900	7.810	15.190	23.000	45.000	550	99.327.852
	CONSTELLATION 26.280 DC 3440MM MT16	3	6X4	7,5	3,0	2,5	205 CV	6.871	7.655	15.345	23.000	42.000	275	97.461.000
	CONSTELLATION 31.280 DC 8X4 MT16	4	8X4	9,9	3,0	2,5	205 CV	6.871	8.580	20.420	29.000		275	119.153.504
	CONSTELLATION 31.330 DC 3440MM MT16	3	6X4	7,5	3,0	2,5	334 CV	8.900	8.290	22.210	30.500	57.000	275	105.672.000
	CONSTELLATION 32.360 DC 4580MM AZ12 8X4	4	8X4	9,9	2,9	2,5	360 CV	8.900	10.070	28.930	39.000		275	139.825.000
	CONSTELLATION 32.360 DC 4580MM AZ12	3	6X4	9,9	2,9	2,5	360 CV	8.900	9.080	23.420	32.500	57.000	275	129.668.416
	CONSTELLATION 32.360 DC 3440 MM AZ12 AC	3	6X4	7,5	2,9	2,5	360 CV	8.900	8.960	23.540	32.500	57.000	275	111.979.000

Fuente: Elaboración propia



9.1.2 Folletos de Vehículos a Hidrógeno

Anexo a este documento se adjunta un documento .pdf (Anexo 8.1.2 Compilado Folletos Vehículos Hidrógeno.pdf) con el compilado de folletos de buses y camiones a hidrógeno que fue posible recolectar.

9.2 Normativa Aplicable para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de la SEC

A modo referencial, se presenta un listado de ejemplos de normas extranjeras relacionadas con el hidrógeno: [75]:

1. **General a toda la cadena de valor:**
 - a. ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines
 - b. ASME STP-PT- 006 Design Guidelines for Hydrogen Piping and Pipelines
 - c. CSA B51 Boiler, Pressure Vessel, and Pressure Piping Code
 - d. ISO 14687 Hydrogen fuel quality – Product specification
 - e. NFPA 2 Caps. 1 a 8 General, CH₂ y LH₂
 - f. NFPA 55 Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code
2. **Producción de H₂:**
 - a. NFPA 2 Cap 13 Hydrogen Generation Systems
 - b. ISO 16110 Hydrogen generators using fuel processing technologies
 - c. ISO 22734 Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications.
3. **Acondicionamiento:**
 - a. ANSI/CSA HGV 4.8-2012 (R2018) Hydrogen gas vehicle fueling station compressor guidelines
4. **Almacenamiento:**
 - a. ASME (BPVC) Boiler and Pressure Vessel Code
 - b. CGA H-2 Guideline for Classification and Labeling of Hydrogen Storage Systems with Hydrogen Absorbed in Reversible
 - c. Metal Hydrides
 - d. EIGA 100/11 Hydrogen Cylinders and Transport Vessels
 - e. EIGA 171/12 Storage of Hydrogen in Systems Located Underground
 - f. NFPA 2 cap. 7 Gaseous Hydrogen
 - g. NFPA 2 cap. 8 Liquefied Hydrogen
 - h. ISO 16111 Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride
5. **Transporte y distribución**
 - a. ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines
 - b. EIGA 121/14 (CGA G-5.6) Hydrogen Pipeline Systems
 - c. EIGA 06/19 Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen
 - d. EIGA 15/06 Gaseous Hydrogen Stations
 - e. Directiva 2008/68/CE, 49 C.F.R. §171 a 180
6. **Calidad del H₂:**
 - a. ISO 14687 Hydrogen fuel quality - Product specification



7. **Celdas a Combustible:**
 - a. IEC 62282 Fuel cell technologies
 - b. NFPA 2 Cap 12 Hydrogen Fuel Cell Power Systems
8. **Estaciones de Dispensado Público de Hidrógeno:**
 - a. ISO 19880-1 Gaseous hydrogen — Fuelling stations-General Requirements
 - b. NFPA 2 Cap 10 GH2 Vehicle Fueling Facilities
 - c. ISO 17268 Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices.
 - d. SAE J2601 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
 - e. SAE J2601/2_2014 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles
 - f. SAE J2601/3_2013 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks
 - g. ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines
9. **Consumo:**
 - a. EIGA 15/06 Gaseous Hydrogen Stations
 - b. IEC 62282 Fuel cell technologies
 - c. ISO 13984 Liquid hydrogen — Land vehicle fueling system interface
 - d. ISO 17268 Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices
 - e. ISO 19880-1 Gaseous hydrogen — Fuelling stations-General Requirements
 - f. ISO 21266 Road vehicles — Compressed gaseous hydrogen (CGH2) and hydrogen/natural gas blends fuel systems
 - g. ISO 23273 Fuel cell road vehicles — Safety specifications — Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen
 - h. NFPA 2 Cap. 7 Gaseous Hydrogen
 - i. NFPA 2 Cap. 8 Liquefied Hydrogen
 - j. NFPA 2 Cap. 10 GH2 Vehicle Fueling Facilities
 - k. NFPA 2 Cap. 11 LH2 Fueling Facilities
 - l. NFPA 2 Cap. 12 Hydrogen Fuel Cell Power Systems
 - m. NFPA 2 Cap. 14 Combustion Applications
 - n. NFPA 2 Cap. 15 Special Atmosphere Applications
 - o. NFPA 2 Cap. 16 Laboratory Operations
 - p. NFPA 2 Cap. 17 Parking Garages
 - q. NFPA 2 Cap. 18 Repair Garage
 - r. SAE AIR6464 Hydrogen Fuel Cells Aircraft Fuel Cell Safety Guidelines
 - s. SAE AS6858 Installation of Fuel Cell Systems in Large Civil Aircraft
 - t. SAE J2578 Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety
 - u. SAE J2579 Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles
 - v. SAE J2601 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
 - w. SAE J2601/2 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles
 - x. SAE J2601/3 Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks
 - y. SAE J2799 Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software
 - z. SAE J2990/1 Gaseous Hydrogen and Fuel Cell Vehicle First
10. **Normas técnicas informativas**
 - a. CGA G-5- 2017 Hydrogen
 - b. CGA G-5.3 Commodity Specification for Hydrogen
 - c. CGA H-4 Terminology Associated with Hydrogen Fuel Technologies

- d. CGA P-28 OSHA Process Safety Management and EPA Risk Management Plan Guidance Document for Bulk Liquid Hydrogen Systems
- e. EIGA 122/18 Environmental impacts of hydrogen plants
- f. EIGA 155/09/E Best available techniques for hydrogen production by steam methane reforming
- g. EIGA Doc 183/13/E Best Available Techniques for the Co-Production of Hydrogen, Carbon Monoxide & their mixtures by Steam Reforming
- h. EIGA 220/19 Environmental Guidelines for Permitting Hydrogen Plants Producing Less Than 2 Tonnes per Day
- i. EN 16942 Fuels - Identification of vehicle compatibility - Graphical expression for consumer information
- j. ISO/TR 15916 Basic considerations for the safety of hydrogen systems

9.3 Cálculo de trabajo y energía

9.3.1 Integración de la ecuación de movimiento

Al integrar la ecuación de movimiento se obtiene:

$$\int_{x_1}^{x_2} M \cdot \frac{dv}{dt} dx = \int_{x_1}^{x_2} F_{traccion} dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{wind} dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{roll} dx - \int_{x_1}^{x_2} F_{gx} dx$$

Ecuación 39

A continuación, se calcula cada una de estas integrales por separado.

9.3.2 Energía cinética

Utilizando $v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow dx = v dt$:

$$\int_{x_1}^{x_2} M \cdot \frac{dv}{dt} dx = \int_{v_1}^{v_2} M \cdot v dv = M \cdot \frac{v^2}{2} \Big|_{v_1}^{v_2}$$

Ecuación 40

$$\Delta E_k = M \cdot \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right)$$

Ecuación 41

9.3.3 Energía de tracción

Por otro lado, la integral de la Fuerza de tracción se define como el trabajo que realiza el vehículo para mantenerse en movimiento, por lo tanto, se define como:

$$\Delta E_{traccion} = \int_{x_1}^{x_2} F_{traccion} dx$$

Ecuación 42

9.3.4 Trabajo de la fuerza del viento

El trabajo por la fuerza del viento se obtiene integrando:

$$\Delta E_{wind} = \int_{d1}^{d2} -\text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{w}_x) \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \frac{\|\vec{v} - \text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{w}_x) \cdot \vec{w}_x\|^2}{2} dx$$

Ecuación 43

$$\Delta E_{wind} = \frac{-\text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{w}_x) \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \int_{d1}^{d2} \|\vec{v} - \text{sign}(\vec{v} \cdot \vec{w}_x) \cdot \vec{w}_x\|^2 dx$$

Ecuación 44

En caso de que \vec{v} y \vec{w}_x se encuentren en el mismo sentido, es decir, $\vec{v} \cdot \vec{w}_x \geq 0$, la expresión resulta:

$$\Delta E_{wind} = \frac{-\rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \int_{d1}^{d2} (v - w_x)^2 dx$$

Ecuación 45

Por su parte, en caso de que \vec{v} y \vec{w}_x se encuentren en sentidos opuestos, es decir, $\vec{v} \cdot \vec{w}_x < 0$, la expresión resulta:

$$\Delta E_{wind} = \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \int_{d1}^{d2} (v + w_x)^2 dx$$

Ecuación 46

En cualquier caso:

$$\Delta E_{wind} = \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \int_{d_1}^{d_2} (v \pm w_x)^2 dx$$

Ecuación 47

Utilizando la definición de velocidad:

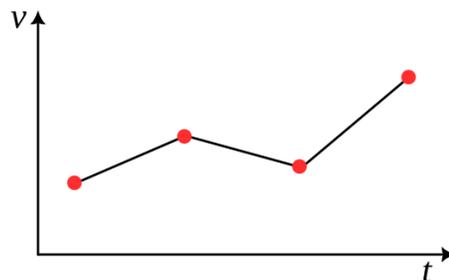
$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow dx = v dt$$

Ecuación 48

Asumiendo una aceleración constante dentro de los intervalos:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Ecuación 49



Se obtiene:

$$\frac{d^2 v}{dt^2} = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow dt = \frac{\Delta t}{\Delta v} dv$$

Ecuación 50

Por otro lado:

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow dx = v dt$$

Ecuación 51

Por lo tanto:

$$dx = v dt = v \frac{\Delta t}{\Delta v} dv$$

Ecuación 52

Con ello, la integral anterior se transforma en:

$$\Delta E_{wind} = \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \int_{v_1}^{v_2} (v \pm w_x)^2 v \frac{\Delta t}{\Delta v} dv = \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \Delta t}{2 \Delta v} \int_{v_1}^{v_2} (v \pm w_x)^2 v dv$$

Ecuación 53

Por simplicidad se define:

$$I = \int_{v_1}^{v_2} (v \pm w_x)^2 v dv$$

Ecuación 54

Utilizando:

$$V = v \pm w_x \Rightarrow v = V \mp w_x$$

Ecuación 55

$$dv = dV$$

Ecuación 56

$$I = \int_{v_1}^{v_2} V^2 \cdot (V \mp w_x) dV = \int_{v_1}^{v_2} V^3 dV \mp w_x \cdot \int_{v_1}^{v_2} V^2 dV$$

Ecuación 57

$$I = \frac{V^4}{4} \Big|_{v_1}^{v_2} \mp w_x \cdot \frac{V^3}{3} \Big|_{v_1}^{v_2}$$

Ecuación 58

$$I = \frac{(v \pm w_x)^4}{4} \Big|_{v_1}^{v_2} \mp w_x \cdot \frac{(v \pm w_x)^3}{3} \Big|_{v_1}^{v_2}$$

Ecuación 59

$$I = \left\{ \left[\frac{(v_2 \pm w_x)^4}{4} - \frac{(v_1 \pm w_x)^4}{4} \right] \mp w_x \cdot \left[\frac{(v_2 \pm w_x)^3}{3} - \frac{(v_1 \pm w_x)^3}{3} \right] \right\}$$

Ecuación 60



Por último:

$$\Delta E_{wind} = \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A \Delta t}{2} \frac{\Delta v}{\Delta v} \cdot I$$

Ecuación 61

Obteniendo:

$$\Delta E_{wind} = \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A \Delta t}{2} \frac{\Delta v}{\Delta v} \cdot \left\{ \left[\frac{(v_2 \pm w_x)^4}{4} - \frac{(v_1 \pm w_x)^4}{4} \right] \mp w_x \cdot \left[\frac{(v_2 \pm w_x)^3}{3} - \frac{(v_1 \pm w_x)^3}{3} \right] \right\}$$

Ecuación 62

Adicionalmente se puede considerar de manera simplificada que $v(t) \approx \bar{v} = \frac{v_2 + v_1}{2}$

$$\Delta E_{wind} \approx \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \int_{d_1}^{d_2} (\bar{v} \pm w_x)^2 dx \approx \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A}{2} \cdot \left(\frac{v_2 + v_1}{2} \pm w_x \right)^2 \int_{d_1}^{d_2} dx$$

Ecuación 63

$$\Delta E_{wind} \approx \pm \frac{\rho_{air} \cdot C_D \cdot A \cdot \Delta x}{2} \cdot \left(\frac{v_2 + v_1}{2} \pm w_x \right)^2$$

Ecuación 64

9.3.5 Trabajo de la resistencia a la rodadura

El trabajo debido a la resistencia a la rodadura se calcula como:

$$\int_{x_1}^{x_2} F_{roll} dx = \int_{x_1}^{x_2} c \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) dx = c \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \Delta x$$

Ecuación 65

$$\Delta E_{roll} = c \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \Delta x$$

Ecuación 66

9.3.6 Trabajo de la fuerza de gravedad

$$\int_{x_1}^{x_2} F_{gx} dx = \int_{x_1}^{x_2} m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) dx = m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \Delta x$$

Ecuación 67

Se expresa $\Delta x \cdot \text{sen}(\alpha) = \Delta h$, por lo tanto, el “trabajo” provocado por esta fuerza es, en realidad, la energía potencial:

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot \Delta h$$

Ecuación 68

9.4 Justificación de los valores y parámetros estimados del modelo de cálculo de consumo

A continuación, se presentan las justificaciones de los valores utilizados presentados en el capítulo 6.4.

- **Valor (USD):** Para estimar el costo del bus a hidrógeno utilizado en este estudio, se toma como referencia el análisis realizado por IDTechEX (2024), el cual indica que el precio promedio de un bus FCEV es aproximadamente tres veces mayor al de un bus diésel y 1,6 veces mayor al de un bus eléctrico. Con esta información, junto con los datos proporcionados por el Ministro de Transportes en una entrevista para La Tercera (<https://www.latercera.com/nacional/noticia/ministro-munoz-responde-a-criticas-por-buses-de-dos-pisos-esto-no-es-mas-carro-que-un-bus-articulado/P2T2JUZI2FFJ5OZLES7LRASUWU/>), donde se menciona que el costo de los buses eléctricos de dos pisos es de aproximadamente 600,000 USD, se estima el valor del bus de dos pisos a hidrógeno considerando estas proporciones.

En el caso del camión, se utilizó como referencia preliminar el valor cotizado para un camión de la marca NIKOLA en etapas previas de este estudio. Sin embargo, se destaca que este valor será actualizado en próximas entregas, ya que no refleja adecuadamente el costo de un camión con las características específicas presentadas en este análisis. Para mejorar la precisión de la estimación, se llevará a cabo una interpolación basada en las diferencias de costo entre camiones diésel con características similares al modelo cotizado de NIKOLA y el camión de carga pesada considerado en este caso.

- **Consumo (kg/100km):** Para estimar el consumo de hidrógeno de cada uno de los vehículos analizados en este estudio, se consideró la autonomía reportada para cada modelo en relación con la capacidad de sus tanques de almacenamiento de hidrógeno. De esta forma, el rendimiento estimado refleja las condiciones de operación bajo las cuales se determinó la autonomía de los vehículos, proporcionando una aproximación coherente a su desempeño en escenarios reales.
- **Eficiencia Batería (%):** Para el caso de la batería, se toma como referencia el promedio esperado de rendimiento de un vehículo eléctrico (BEV) debido a la similitud en el funcionamiento y composición tecnológica entre ambos sistemas. Este enfoque se respalda en la información presentada por Li, M., Zhang, X., & Li, G. (2016).

9.5 Perfiles de Elevación principales rutas regiones de Antofagasta y del Biobío

9.5.1 Rutas Región de Antofagasta

Los perfiles de elevación de las principales rutas de la Región de Antofagasta se muestran en las siguientes figuras. En los casos en los que la representación sea demasiado accidentada, se utilizará una aproximación de media móvil de la curva, considerando un periodo acorde a la cantidad de puntos muestreados a lo largo de la ruta.



Figura 9-1: Perfil de Elevación Ruta 1 Tramo Norte (Media móvil de período 20).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

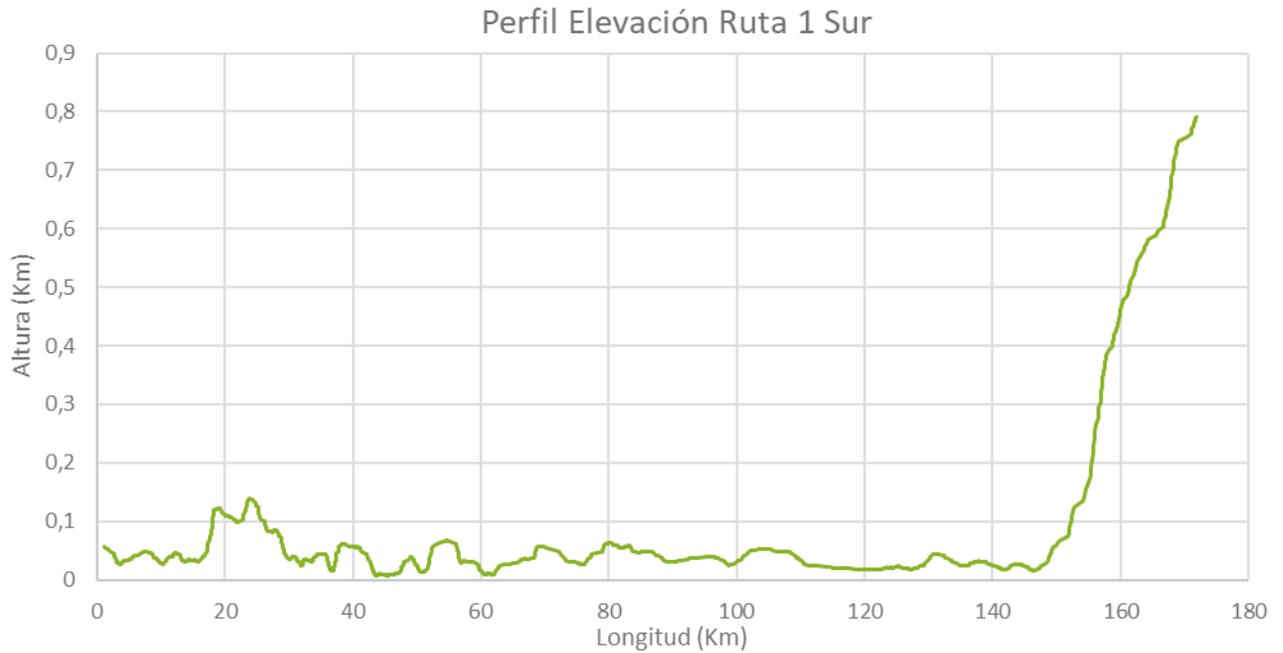


Figura 9-2: Perfil de Elevación Ruta 1 Tramo Sur (Media móvil de período 20).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.



Figura 9-3: Perfil de Elevación Ruta 5 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 21

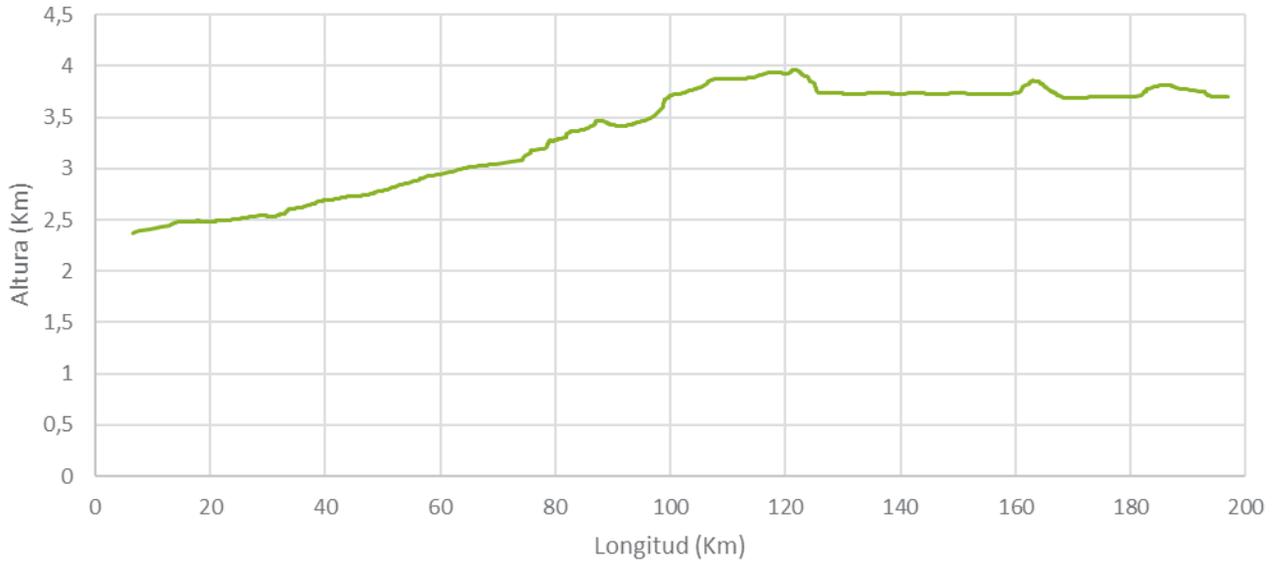


Figura 9-4: Perfil de Elevación Ruta 21 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil de Elevación Ruta 23

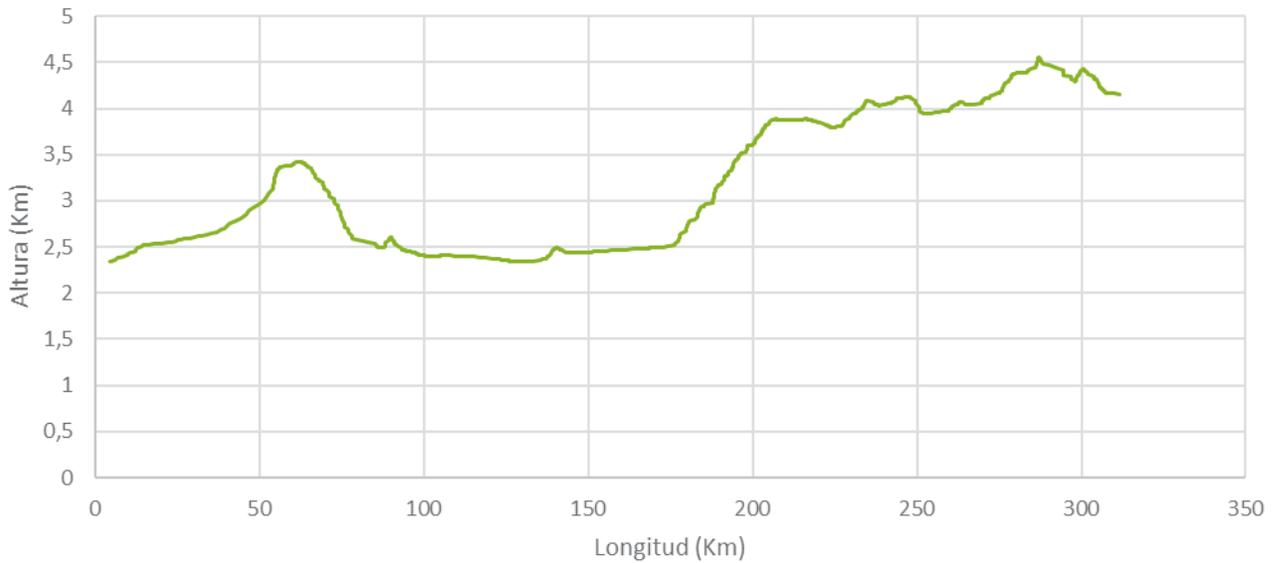


Figura 9-5: Perfil de Elevación Ruta 23 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 24

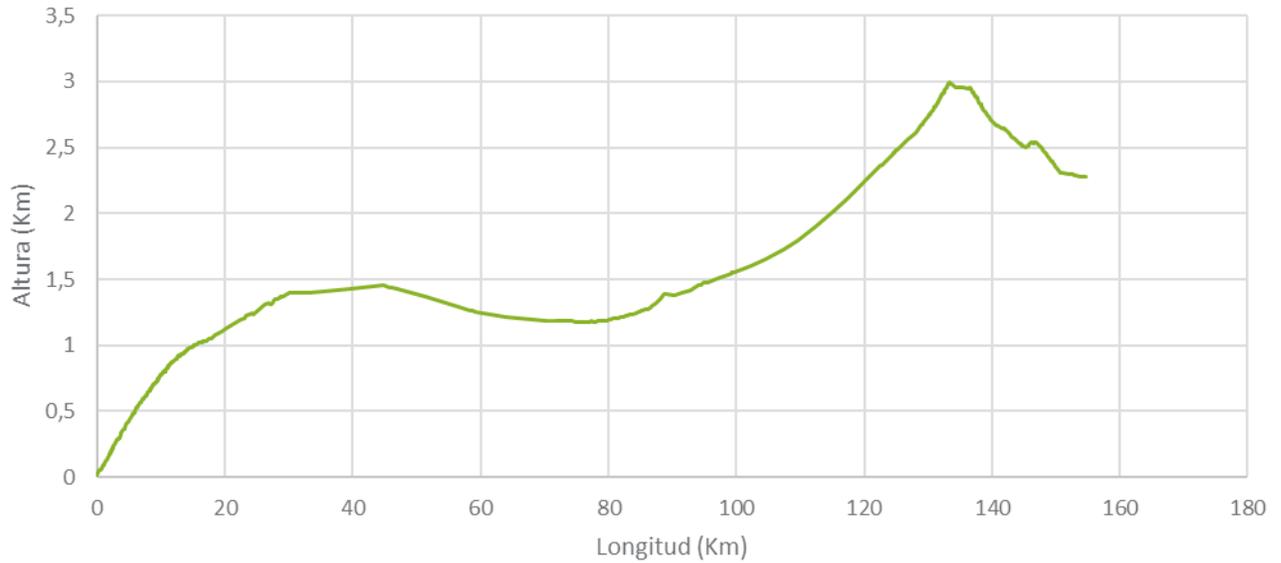


Figura 9-6: Perfil de Elevación Ruta 24.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 25

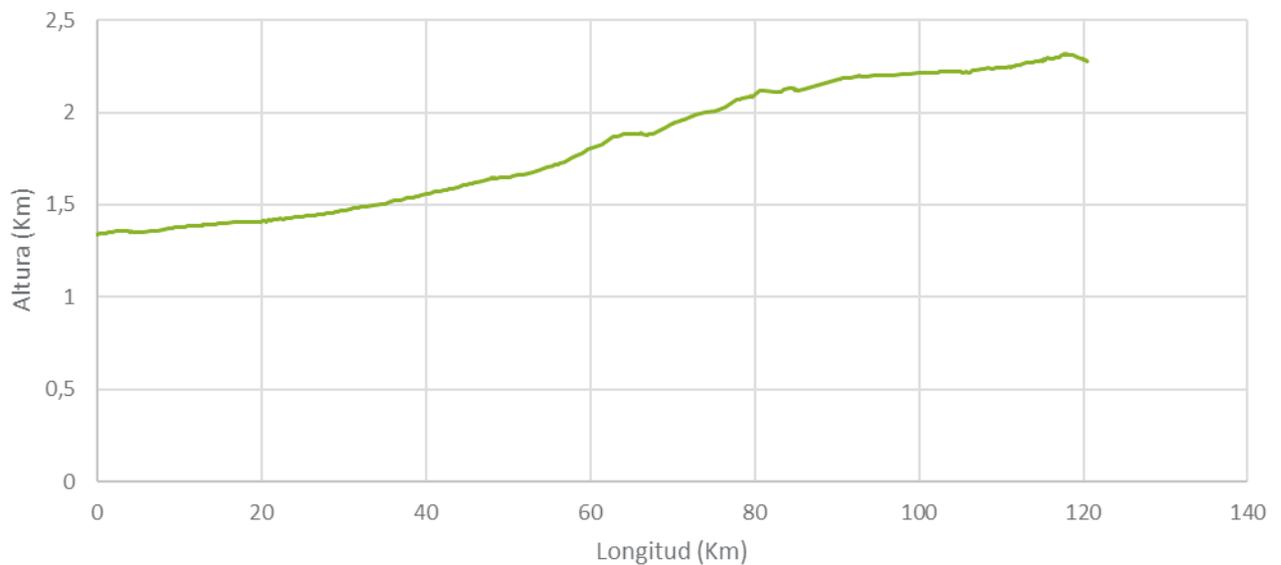


Figura 9-7: Perfil de Elevación Ruta 25.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.



Figura 9-8: Perfil de Elevación Ruta 26 (Media móvil de período 3)

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 27

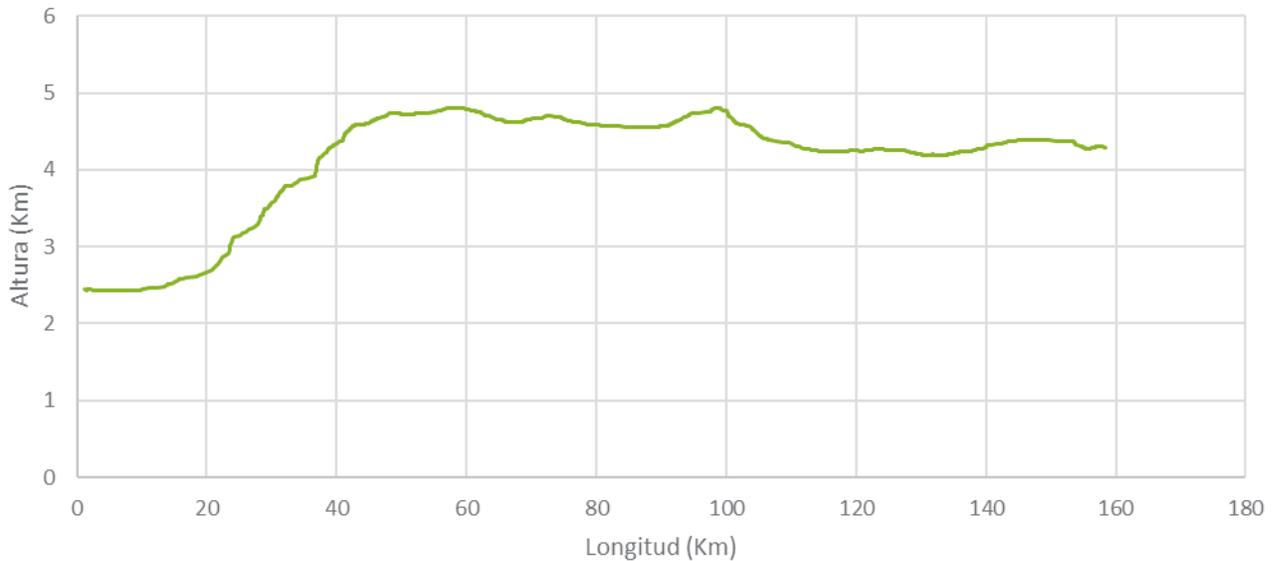


Figura 9-9: Perfil de Elevación Ruta 27 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 28

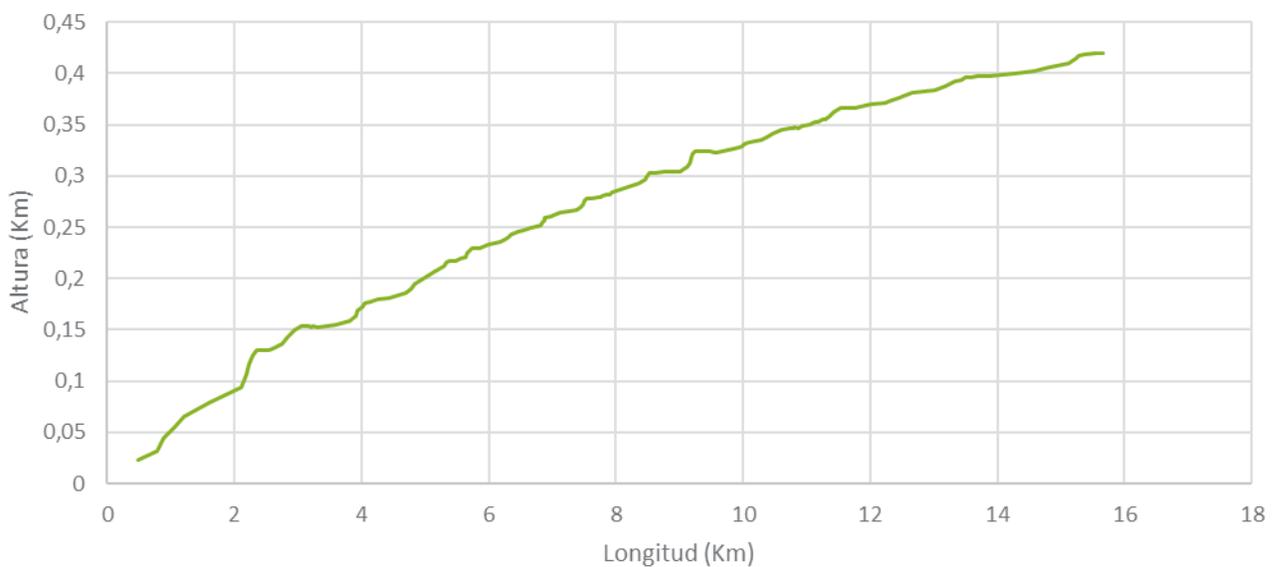


Figura 9-10: Perfil de Elevación Ruta 28 (Media móvil de período 5).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

9.5.2 Rutas Región del Biobío

Los perfiles de elevación de las principales rutas de la región del Biobío se muestran en las siguientes figuras.



Figura 9-11: Perfil de Elevación Ruta N-14-O (Media móvil de período 15).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta N-48-O



Figura 9-12: Perfil de Elevación Ruta N-48-O (Media móvil de período 50).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta N-59-Q



Figura 9-13: Perfil de Elevación Ruta N-59-Q (Media móvil de período 100).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta P-20

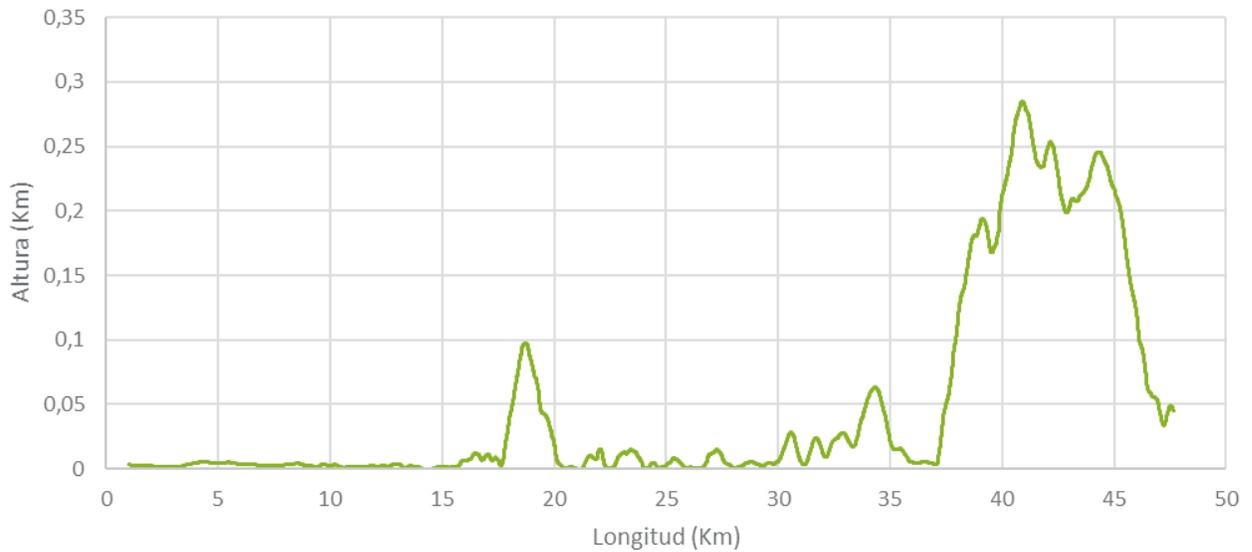


Figura 9-14: Perfil de Elevación Ruta P-20 (Media móvil de período 30).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta P-40



Figura 9-15: Perfil de Elevación Ruta P-40 (Media móvil de período 50).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta P-60-R



Figura 9-16: Perfil de Elevación Ruta P-60-R (Media móvil de período 50).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta P-72-S



Figura 9-17: Perfil de Elevación Ruta P-72-S (Media móvil de período 60).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta Q-34



Figura 9-18: Perfil de Elevación Ruta Q-34 (Media móvil de período 40).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta Q-45



Figura 9-19: Perfil de Elevación Ruta Q-45 (Media móvil de período 30).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta Q-61



Figura 9-20: Perfil de Elevación Ruta Q-61 (Media móvil de período 60).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta Q-90



Figura 9-21: Perfil de Elevación Ruta Q-90 (Media móvil de período 15).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta Q-97-N

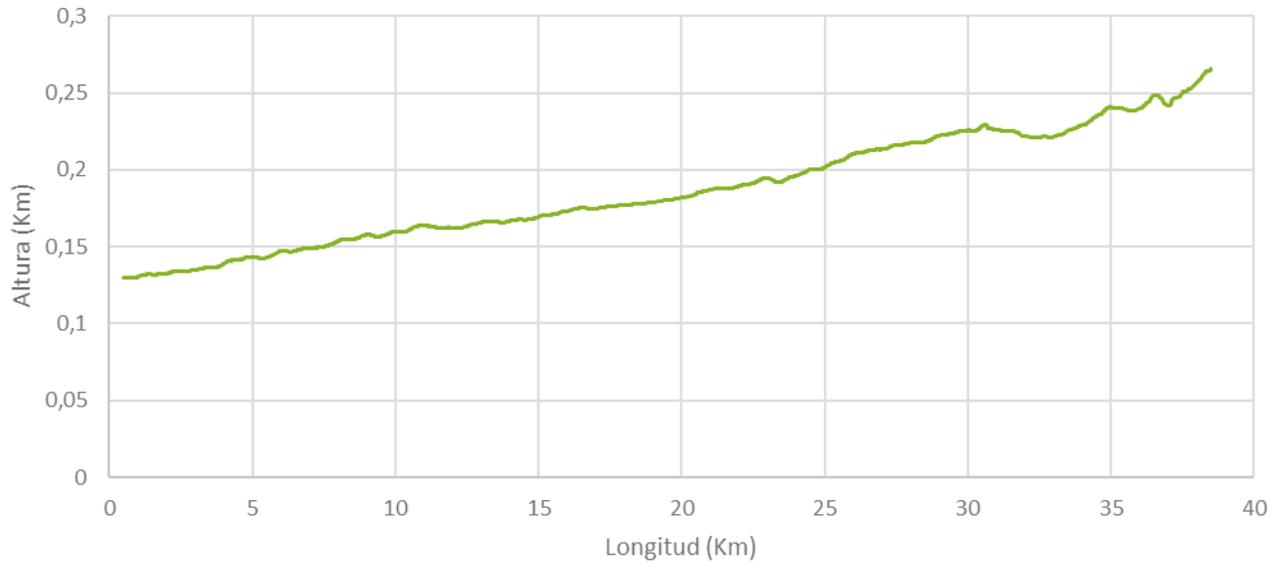


Figura 9-22: Perfil de Elevación Ruta Q-97-N (Media móvil de período 30).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 5



Figura 9-23: Perfil de Elevación Ruta 5 (Media móvil de período 20).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Ruta 126-S



Figura 9-24: Perfil de Elevación Ruta 126-S (Media móvil de período 30).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 146



Figura 9-25: Perfil de Elevación Ruta 146 (Media móvil de período 50).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 150 (Tramo 1)

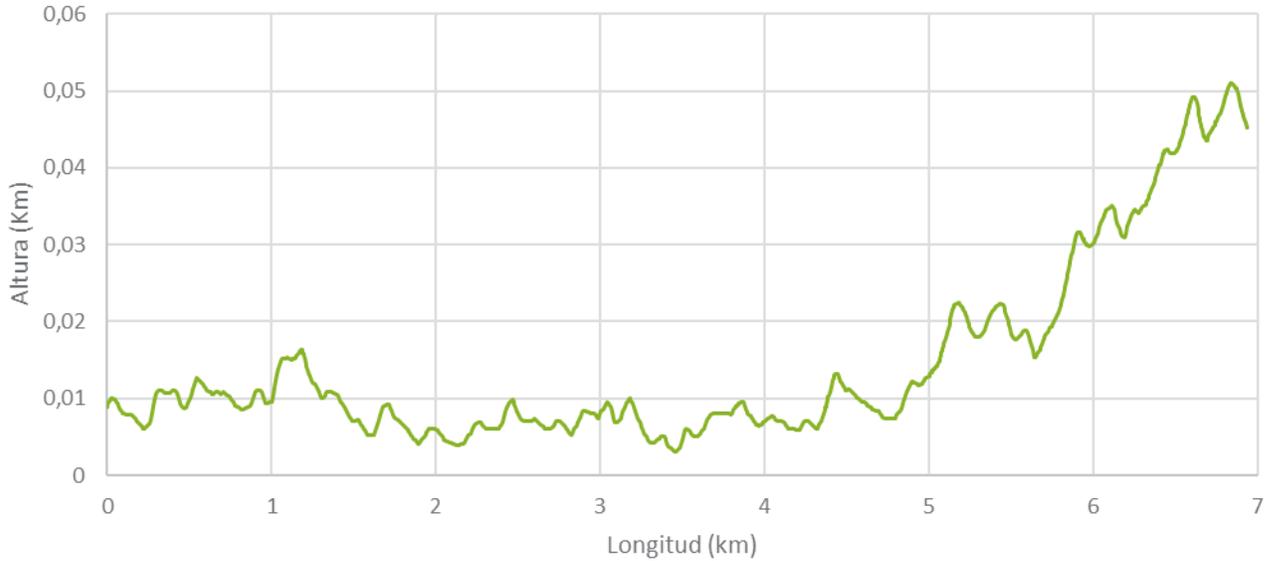


Figura 9-26: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 1.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 150 (Tramo 2)



Figura 9-27: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 2 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 150 (Tramo 3 al Norte)



Figura 9-28: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 3 al norte (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 150 (Tramo 3 al sur)



Figura 9-29: Perfil de Elevación Ruta 150 Tramo 3 al sur (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 152

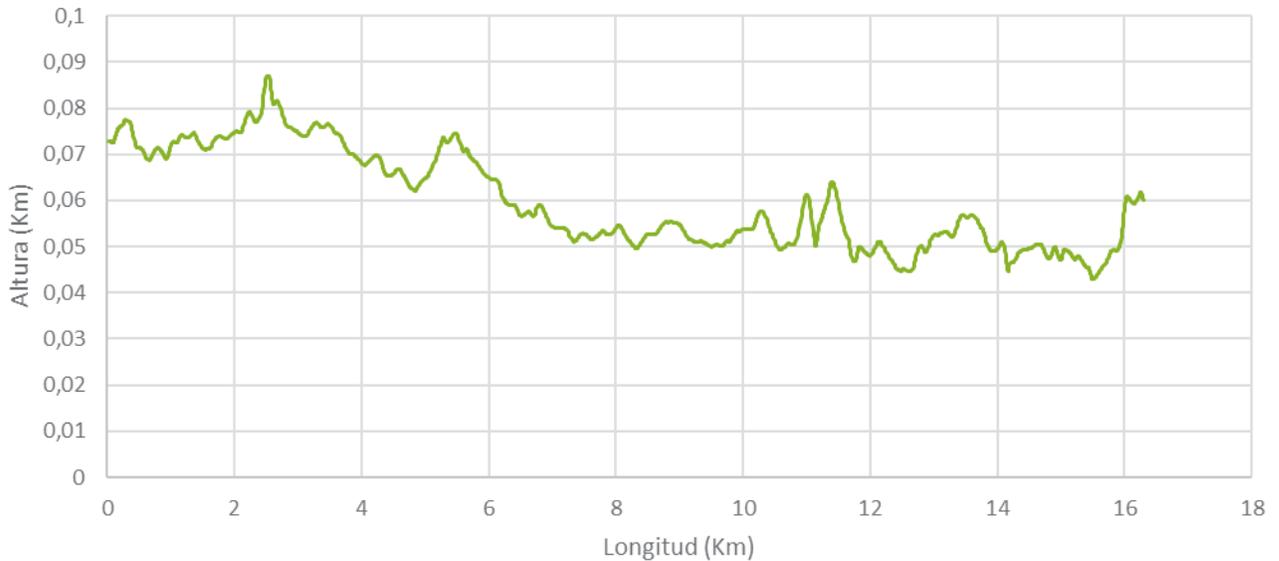


Figura 9-30: Perfil de Elevación Ruta 152 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 154



Figura 9-31: Perfil de Elevación Ruta 154 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 156



Figura 9-32: Perfil de Elevación Ruta 156 (Media móvil de período 100).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

Perfil Elevación Ruta 158



Figura 9-33: Perfil de Elevación Ruta 158 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 160



Figura 9-34: Perfil de Elevación Ruta 160 (Media móvil de período 100).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 177



Figura 9-35: Perfil de Elevación Ruta 177 (Media móvil de período 10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 178



Figura 9-36: Perfil de Elevación Ruta 178.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Perfil Elevación Ruta 180



Figura 9-37: Perfil de Elevación Ruta 180 (Media móvil de período 20).

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.



cityPlanning



10 Referencias

- [1] Naciones Unidas, «Qué es el cambio climático,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>.
- [2] H2 Chile, «H2 Chile,» 5 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://h2chile.cl/2022/05/primer-camion-minero-a-hidrogeno-verde-es-presentado-en-sudafrica-por-angloamerican/>.
- [3] European Commission, «Hydrogen,» 2022. [En línea].
- [4] M. d. M. A. MMA, *Inventario Nacional Gases Efecto Invernadero 2020*, 2022.
- [5] Roland Berger, «Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty’s High Performance Green Solution,» FCH 2 JU, Bruselas, 2020.
- [6] IEA, «ETP Clean Energy Technology Guide,» Octubre 2024. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>.
- [7] O. H. e. AI, "On the use of ammonia as a fuel – A perspective," Fuel Communications, vol. 11, no. 2022, p. 16, 2022.
- [8] Amon Consortium, «Ammonia to Power,» 2023. [En línea]. Available: <https://amon-project.eu/>.
- [9] Audi, «Audi steps up research into synthetic fuels,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/audi-steps-up-research-into-synthetic-fuels-9546>.
- [10] V. Dieterich y K. Neumann, «Techno-economic assessment of renewable dimethyl ether production pathways from hydrogen and carbon dioxide in the context of power-to-X,» Energy, vol. 301, 2024.
- [11] J. Zhang, «Recent Studies on Alternative Fuel of Dimethyl Ether,» Trends in Renewable Energy, pp. 1-10, 2023.



- [12] CRI, «Sitio Web Carbon Recycling International,» 2024. [En línea]. Available: <https://carbonrecycling.com/>.
- [13] Concauwe, «Role of e-fuels in the European transport system. Literature review,» Bruselas, 2020.
- [14] Y.-H. Pu, Q. Dejaegere, M. Svensson y S. Verhelst, «Renewable Methanol as a Fuel for Heavy-Duty Engines: A Review of Technologies Enabling Single-Fuel Solutions,» Energies, 2024.
- [15] A. R. Ochoa, «Los coches más rápidos del mundo y su velocidad máxima,» 09 07 2024. [En línea]. Available: <https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/g38887240/coches-mas-rapidos-mundo/>.
- [16] European Parliament, «European Parliament,» 14 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>.
- [17] R. Qussay, Al-Zubaidi y D. Khalid, «A Review: Fuel Cells Types and their Applications,» 2023.
- [18] Mancino, A. Nicolás, C. Menale y F. Vellucci, «PEM Fuel Cell Applications in Road Transport,» Energies, 2023.
- [19] S. Cleghorn, «Hydrogen Council,» 2022. [En línea]. Available: <https://hydrogencouncil.com/es/how-membrane-technology-is-driving-the-commercialization-of-fuel-cells-in-the-automotive-industry/>.
- [20] C. Marquardt, «RVK Cologne: the first buses from the Northern Irish manufacturer Wrightbus for Germany,» Urban Transport Magazine, 2024. [En línea]. Available: [https://www.urban-transport-magazine.com/en/rvk-cologne-the-first-buses-from-the-northern-irish-manufacturer-wrightbus-for-germany/#:~:text=Regionalverkehr%20K%C3%B6ln%20\(RVK\)%20is%20the,right%2Dhand%20traffic%20from%20Wrightbus..](https://www.urban-transport-magazine.com/en/rvk-cologne-the-first-buses-from-the-northern-irish-manufacturer-wrightbus-for-germany/#:~:text=Regionalverkehr%20K%C3%B6ln%20(RVK)%20is%20the,right%2Dhand%20traffic%20from%20Wrightbus..) [Último acceso: Enero 2025].
- [21] M. S. Alias y K. S.K., «Active direct methanol fuel cell: An overview,» Elsevier, 2020.
- [22] "RGZ Technologies," Agosto 2024. [Online]. Available: <https://grz-technologies.com/es/wiki/tecnologia-de-pila-de-combustible/>.
- [23] APPICE, «Pilas de Combustible Alcalina,» [En línea]. Available: <https://appice.es/pilas-de-combustible-alcalinas/>.



- [24] M. Flekiewicz y K. Grzegorz, «Hydrogen Onboard Storage Technologies for Vehicles,» 2023.
- [25] CTM Europe, «Hydrogen systems and pipework,» Noviembre 2024. [En línea]. Available: <http://www.ctmeurope.co.uk/hydrogen-systems/>.
- [26] Gómez, J. A. y D. M. Santos, «The Status of On-Board Hydrogen Storage in Fuel Cell,» Designs, 2023.
- [27] IEA, «Global Hydrogen Review 2024,» Agencia Internacional de la Energía, 2024.
- [28] FUKUTA ELEC. & MACH. CO, LTD., «Types of Electric Motors for Electric Vehicles: How to Choose,» 07 06 2024. [En línea]. Available: https://www.fukuta-motor.com.tw/en/news_i/K06/N2024060700001.
- [29] Monolithic Power Systems, «Power Electronic for Electric Vehicles,» 10 2023. [En línea]. Available: https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/special-topics/power-electronic-for-electric-vehicles?srsId=AfmBOopFa6YxSrBwyDWq2jTDVMqMnGQ8zT4o08FnUk-RUGCn_twPI6zU.
- [30] Neomotor, «¿Cuánto cuesta el combustible sintético?,» Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://neomotor.epe.es/industria/cuanto-cuesta-el-combustible-sintetico-HI1208669>.
- [31] Diario Sustentable, «Diario Sustentable,» Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.diariosustentable.com/2023/10/copec-y-linde-desarrollaron-hidrolinera-para-primer-bus-de-h2-en-chile/>.
- [32] Hydratech Industries, «Hydrogen Mobile Station,» Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://hydratechcorp.com/hydrogen-technology/hydrogen-mobile-station/>.
- [33] McKinsey & Company, «Hydrogen Insights 2024,» Hydrogen Council, 2024.
- [34] SynerHy, «Métodos de almacenamiento y transporte de hidrógeno,» 2022. [En línea]. Available: <https://synerhy.com/2022/05/metodos-de-almacenamiento-y-transporte-de-hidrogeno/>.
- [35] Hydrogen Council, «Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective,» 2020.
- [36] Z. Chen y H. Wang, «Total Cost of Ownership Analysis of Fuel Cell Electric Bus with Different Hydrogen Supply Alternatives,» Sustainability, 2024.



- [37] M. Sayer, A. Ajanovic y R. Haas, «On the economics of a hydrogen bus fleet powered by a wind park – A case study for Austria,» International Journal of Hydrogen Energy, 2022.
- [38] DOE, «U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>.
- [39] World Economic Forum, «Green Hydrogen in China: A Roadmap for Progress. White Paper,» 2023.
- [40] Hydrogen Fuel News, «China Unveils ¥300 Billion Subsidy Blitz That'll Drive Hydrogen Vehicle Growth,» Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://www.hydrogenfuelnews.com/china-subsidy-hydrogen-vehicle/8566167/>.
- [41] Plataforma tecnológica española de eficiencia energética, «La Comisión Europea publica su nueva estrategia para el hidrógeno renovable,» Julio 2020. [En línea]. Available: <https://news.ptee.org/noticia/la-comision-europea-publica-su-nueva-estrategia-para-el-hidrogeno-renovable>.
- [42] Ministerio de Energía, «Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,» Santiago de Chile, 2020.
- [43] Ministerio de Energía, «Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030,» Santiago, 2024.
- [44] Universidad Católica de Chile, «Evaluación Técnico-Económica de la Implementación de una Flota de Buses de Hidrógeno en el Sistema de Transporte Metropolitano RED,» Programa CALAC+, Santiago, 2022.
- [45] Universidad Católica de Chile, «Evaluación técnico-económica implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano,» Santiago, 2021.
- [46] Corfo, «Estudio para definir esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de Hidrógeno Verde en Chile,» Santiago, 2020.
- [47] Corporación Alta Ley, «En 2025 se estrenará el primer bus a hidrógeno hecho en Chile,» enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.corporacionaltaley.cl/el-2025-se-estrenara-el-primer-bus-a-hidrogeno-hecho-en-chile/>.
- [48] Walmart Chile, «Distribución sustentable: Walmart Chile y Grupo Marval lanzan primer camión de hidrógeno verde en el país,» Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.walmartchile.cl/revolucion-sustentable-walmart-y-marval-lanzan-primer-camion-de-hidrogeno-verde-en-chile/>.
- [49] Sotraser, «Sotraser incorpora el primer camión a hidrógeno de Chile a su flota de Cero Emisiones,» Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.sotraser.cl/noticias/sotraser-incorpora-el-primer-camion-a-hidrogeno/>.



- [50] *Diario Sustentable*, «Copec implementará la primera hidrolinera para camiones de alto tonelaje en Chile,» 7 Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.diosustentable.com/2025/01/copec-implementara-la-primera-hidrolinera-para-camiones-de-alto-tonelaje-en-chile/>.
- [51] R. Danielis, M. Scorrano, M. Masutti, A. Awan y A. Niazi, *Fuel Cell Electric Buses: A Systematic Literature Review*, *Energies* 2024, 17, 5096. <https://doi.org/10.3390/en17205096>, 2024.
- [52] H. B. Ben Sharpe, «A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks,» *The International Council on Clean Transportation*, 2022.
- [53] Alibaba, «Results for global suppliers for hydrogen refueling station,» Noviembre 2024. [En línea]. Available: https://www.alibaba.com/trade/search?spm=a2700.galleryofferlist.the-new-header_fy23_pc_search_bar.keydown__Enter&tab=all&SearchText=hydrogen+refueling+station.
- [54] J. Bracci, M. Koleva y M. Chung, «Levelized Cost of Dispensed Hydrogen for Heavy-Duty Vehicles,» NREL, 2024.
- [55] Blackridge Research & Consulting, Noviembre 2024. [En línea].
- [56] A. J. Cruz, «Hydrogen Value Chain: Critical platform of the energy transition ecosystem,» de *The Clean Hydrogen Economy and Saudi Arabia*, 2024.
- [57] MinEnergía, «Proposición de estrategia regulatoria del hidrógeno para Chile,» 2020.
- [58] M. d. Energía, «Proposición de estrategia regulatoria del hidrógeno para Chile,» 2020.
- [59] M. De Boer, «Understanding how the value chains of e-bus public transport work for six European regions,» 2023.
- [60] Minenergía, «Plataforma de Electromovilidad,» 2024. [En línea]. Available: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/ecocarga>.
- [61] ICEX España Exportación e Inversiones, «El Hidrógeno Verde en Chile,» *Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Santiago de Chile*, Santiago, 2024.
- [62] T. Conversation, «The Conversation, Academic rigour, journalistic fair,» 2022. [En línea]. Available: <https://theconversation.com/coches-de-hidrogeno-como-funcionan-precios-autonomia-repostaje-debilidades-y-riesgos-193405>.



- [63] *Autofact, «Autofact Blog,» 21 noviembre 2024. [En línea]. Available: https://www.autofact.cl/blog/comprar-auto/mercado/auto-hidrogeno?utm_source=chatgpt.com.*
- [64] *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Informe en materia regulatoria: regulación comparada del hidrógeno verde y propuestas políticas para su fomento,» Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, 2022.*
- [65] *MEN, Centro de Energía UC y GIZ, Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile, 2020.*
- [66] *Ministerio de Energía, Plan de Trabajo de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030, 2024.*
- [67] *MinEnergía, «Plan de Trabajo de Regulaciones Habilitantes para el Desarrollo de la Industria de Hidrógeno en Chile 2024-2030,» Santiago, 2024.*
- [68] *Banco Interamericano de Desarrollo, «Innovación y desarrollo tecnológico para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile,» 2023.*
- [69] *Universidad de Chile, Hidrógeno Verde: barreras de entrada y propuesta de gestión ambiental para su producción en Chile, Santiago: Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, 2023.*
- [70] *A. Vallejos-Romero, S. Salvo y J. Garrido, «Las dimensiones sociales de los riesgos en torno a conflictos socioambientales por energía en Chile. La confianza en el conflicto de la Termoeléctrica Castilla,» Papers: Revista de Sociología, 2015.*
- [71] *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «Disponibilidad del recurso hídrico en el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados en Chile,» Santiago, 2023.*
- [72] *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «Cuantificación del encadenamiento laboral para el desarrollo del hidrógeno en Chile bajo un escenario de exportación,» Santiago, 2021.*
- [73] *H2 Chile, «Estudio H2 en Chile: Capital humano de la industria del hidrógeno renovable: desafíos actuales y futuros,» Santiago, 2023.*
- [74] *Ministerio de Energía, Decreto 13, Aprueba Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno e Introduce Modificaciones al Reglamento de Instaladores de Gas, 2020.*
- [75] *Ministerio de Energía, Guía de Apoyo para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno, 2024.*



- [76] SEA, *Criterio de Evaluación en el SEIA: Descripción integrada de proyectos para la generación de hidrógeno Verde en el SEIA, 2023.*
- [77] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Resolución Exenta Electrónica N° 16062: Autoriza a Linde Gas Chile S.A. a proyecto "Estación de servicio de hidrógeno Linde", según se indica,» Santiago, 2023.
- [78] MMA, *Entra en vigencia nueva norma de emisiones para camiones y buses nuevos que ingresen al país, <https://mma.gob.cl/entra-en-vigencia-nueva-norma-de-emisiones-para-camiones-y-buses-nuevos-que-ingresen-al-pais/>, 2024.*
- [79] DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE, «DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE,» DGAC Chile, 31 12 2024. [En línea]. Available: <https://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>. [Último acceso: 25 02 2025].
- [80] Banco Central de Chile, «Indicadores diarios,» 26 02 2025. [En línea]. Available: https://si3.bcentral.cl/indicadoresiete/secure/Serie.aspx?gcode=PRE_TCO¶m=RABmAFYAWQB3AGYAaQBuAEkALQAzADUAbgBNAGgAaAAkADUAVwBQAC4AbQBYADAARwBOAGUAYwBjACMAQQBaAHAARgBhAGcAUABT AGUAdwA1ADQAMQA0AE0AawBLAF8AdQBDAQSABzAG0AXwA2AHQAawBvAFcAZwBKAEwAegBzAF8A. [Último acceso: 26 02 2025].
- [81] California Air Resources Board, «Draft Advanced Clean Fleets Total Cost of Ownership,» California, 2021.
- [82] Comisión Nacional de Energía, «Informe de proyecciones de precios de combustibles 2024-2044,» Departamento Hidrocarburos, Santiago, 2024.
- [83] PrecioBencina, «PrecioBencina,» 24 02 2025. [En línea]. Available: <https://preciobencina.cl/contacto.php>. [Último acceso: 24 02 2025].
- [84] Ministerio de Energía, «Hidrogeno Verde Un proyecto país,» Chile, 2022.
- [85] Servicio de Impuestos Interno, «NUEVA TABLA DE VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO,» SII, 2022. [En línea]. Available: https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm. [Último acceso: 27 02 2025].
- [86] Zhang, Yali and Yuan, Wei and Fu, Rui and Wang y Chang, «Design of an energy-saving driving strategy for electric buses,» IEEE Access, vol. 7, pp. 157693-157706, 2019.
- [87] Husain, Iqbal and Islam y Mohammad S, «Design, modeling and simulation of an electric vehicle system,» SAE transactions, pp. 2168-2176, 1999.



- [88] National Aeronautics and Space Administration, «Earth Atmosphere Model,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html>. [Último acceso: 28 Enero 2025].
- [89] The Engineering ToolBox, «Rolling Resistance,» 2008. [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html. [Último acceso: 28 Enero 2025].
- [90] Giuseppe Di Piero, Evangelos Bitsanis, Alessandro Tansini, Christian Bonato, Giorgio Martini y Georgios Fontaras, «Fuel Cell Electric Vehicle Characterisation under Laboratory and Inuse Operation,» Energy Reports, vol. 11, pp. 611-623, 2024.
- [91] C Bayındırlı, YE Akansu y MS Salman, «The determination of aerodynamic drag coefficient of truck and trailer model by wind tunnel tests,» International Journal of Automotive Engineering and Technologies, vol. 5, n° 2, pp. 53-60, 2016.
- [92] M. Ç. C Bayındırlı, «The experimentally and numerically determination of the drag coefficient of a bus model,» International Journal of Automotive Engineering and Technologies, vol. 7, n° 3, pp. 117--123, 2018.
- [93] M. Li, X. Zhang y G. Li, «A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis,» Energy, vol. 94, pp. 693-704, 2016.
- [94] Giannelli, R and Nam, EK and Helmer y Kent and Youn, «Heavy-duty diesel vehicle fuel consumption modeling based on road load and power train parameters,» SAE TECHNICAL PAPERS SERIES, Chicago, 2005.
- [95] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Poderes caloríficos inferiores de las principales fuentes energéticas,» IDAE, España, 2020.
- [96] Achour, Youssef and Berrada, Asmae and Arechkik, Ameer and El Mrabet y Rachid, «Techno-Economic Assessment of hydrogen production from three different solar photovoltaic technologies,» International Journal of Hydrogen Energy, vol. 48, n° 83, pp. 32261-32276, 2023.
- [97] C. Armenta-Deu y H. Cortés, «Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles,» Vehicles, vol. 5, n° 2, pp. 387-403, 2023.
- [98] Alexander Dennis, «Ficha Técnica Enviro400FCEV,» Alexander Dennis, Larbert, 2023.
- [99] Quantron, «Ficha técnica QHM FCEV 44-1000,» Quantron, Augsburg, 2022.
- [100] Esg Times, «Volvo Revs Up for Hydrogen Trucks: Trials Begin in 2026,» Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.esgtimes.in/energy/hydrogen/volvo-revs-up-for-hydrogen-trucks-trials-begin-in-2026/>.



- [101] *Agora, «The future cost of electricity-based synthetic fuels,» 2018.*
- [102] *Shell Deutschland Oil GmbH & Wuppertal Institut, «Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2,» 2017.*
- [103] *Statista, Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/>.*
- [104] *M. Koleva y M. Melaina, «Hydrogen Fueling Stations Cost,» Department of Energy Hydrogen Program Record. USA, 2021.*
- [105] *H2 Chile, «Hidrógeno verde en minería: Alternativas y aplicaciones,» 2021.*
- [106] *University of Calgary, «Energy Education,» [En línea]. Available: https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Densidad_energ%C3%A9tica#cite_note-r3-4.*
- [107] *Wang, Jinghui and Rakha y Hesham A, «Fuel consumption model for heavy duty diesel trucks: Model development and testing,» Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 55, pp. 127–141, 2017.*



cityPlanning



Agencia de
Sostenibilidad
Energética



aiguasol
LATAM

Evaluación Viabilidad Técnico-Económica en la Implementación Hidrógeno Verde en el Transporte Pesado de Carga y Pasajeros

Autores:

Javiera Olguín, Cityplanning

Alfredo González, Aiguasol

Melanie Andersen, Cityplanning

Catalina Bravo, Aiguasol

Felipe Sanhueza, Cityplanning

Daniel Mardini, Aiguasol

Daniel González, Aiguasol

Revisión y Edición:

Ignacio Reyes, Agencia de Sostenibilidad Energética

Luis Castillo, Agencia de Sostenibilidad Energética

Matías García, Ministerio de Energía

Jefe de Proyecto

Ricardo Flores, Agencia de Sostenibilidad Energética

