



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

EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE CAMIONES  
ELÉCTRICOS PARA USO EN LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO JAVIER BASAURE FIGUEROA

PROFESOR GUÍA:  
KIMBERLY SANCHEZ SIMANCAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ  
SANDRA TORRES MENDOZA

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: FRANCISCO JAVIER BASAURE FIGUEROA  
FECHA: 2021  
PROF. GUÍA: KIMBERLY SANCHEZ SIMANCAS

## EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE CAMIONES ELÉCTRICOS PARA USO EN LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA

La industria mundial requiere convertir materias primas en productos finales para clientes, requiriendo transporte de productos. La logística de última milla es el último eslabón de esta cadena de suministros, siendo producto de hasta el 41 % del costo de transporte total, junto con representar un porcentaje importante de emisiones de gases de invernadero en ciudades, que es el ambiente el cual la logística de última milla se desenvuelve.

La implementación de tecnologías sustentables tanto ambiental como económicamente para soluciones de transporte ha tenido un rol fundamental debido a restricciones operacionales causadas por el cambio climático, por lo que opciones como camiones eléctricos para su uso urbano permiten operar en lugares con restricciones ambientales, junto con poseer ventajas técnicas por mantención y operación.

Con el fin de contribuir a esta problemática, se realizó un estudio técnico y un análisis económico de camiones eléctricos en flotas de logística de última milla, para determinar la factibilidad del futuro reemplazo de camiones diesel a camiones eléctricos en operaciones urbanas de logística de última milla.

Los resultados muestran que es posible una implementación técnica de camiones eléctricos, debido que las características críticas de operación de logística de última milla son posibles de realizar con camiones eléctricos, completando las rutas realizadas actualmente sin requerimientos de carga en ciudad.

Es necesario mencionar que no en todos los casos un camión eléctrico es menos contaminante que un camión diesel en operación, con una mezcla de altos rendimientos de camiones diesel y alta contaminación asociada a la matriz energética del país para la energía requerido del camión eléctrico, es posible que las emisiones de  $CO_2$  en flotas eléctricas sea mayor que en flotas diesel.

Económicamente, los resultados muestran que en la actualidad no es conveniente un reemplazo de camiones diesel a eléctricos debido al alto CAPEX asociado a la compra de estos vehículos, que no son amortiguados por la disminución substancial del OPEX.

Es posible una disminución de CAPEX actual mediante diversas estrategias empresariales, como una disminución del dimensionamiento de las baterías o reducciones en costos de intermediarios.

Finalmente, a pesar que económicamente hoy un reemplazo de camiones diesel a eléctricos no es conveniente, por mejoras en tecnologías y economías de escala, los valores de los camiones eléctricos disminuyen drásticamente a través de los años, logrando beneficios económicos tangibles en Chile y Mexico desde el año 2022.



*Dedicado a mis padres, a todos aquellos que me han enseñado y a mis amigos del alma que me han ayudado y apoyado en mi vida, Gracias.*



# Agradecimientos

Es difícil poder agradecer a cada una de las personas que me han ayudado a realizar lo que he querido en mi vida, a superar los obstáculos y levantarme cuando me he caído, pero en estas líneas es posible mostrar un poco de lo profundamente agradecido por todo.

Le agradezco a mis padres, Maria Patricia y Rosendo, por apoyarme en todo lo académico, mostrarme que era lo bueno y lo malo, entregándome los valores que deberían perdurar para una vida sana, por entregarme oportunidades y darme lo necesario, por mostrarme todo lo que tenían a disposición para poder seguir mis objetivos y sueños, por irme a buscar y a dejar a tantos lados para que estuviera seguro cuando era pequeño y por incentivarme a estudiar y ser mejor persona todos los días, infinitas gracias, no saben cuanto se los agradezco.

Le agradezco a mis amigos que he hecho a través de los años, a mis amigos de mecánica, del colegio y gente especial que se ha quedado en mi vida a pesar de las dificultades, Tente, Papo, Noe, José y Meli, Nacha, Vale, Yani, Nati, Cami, Rafa, Matheus, Carlitos, Coto, Ivan, Alan, Dan, Franco. Le agradezco de manera especial a Sofi, Alme, Xavi e Italo, que me han apoyado incondicionalmente, que han estado ahí en las buenas y en las malas, que me han hecho reír y vivir, son parte de mi familia que uno elige, los amo, gracias.

Le agradezco a mis amigos provinciales y segundos hermanos, Jose y Mati Salamé, con los que me he desarrollado de una manera muy distinta a la académica, de una manera espiritual y musical, que me han tratado como buenos amigos, como hermanos y hasta como familia, igual a sus padres que me han tratado con mucho cariño, gracias.

Le agradezco a las personas que me enseñaron todas las cosas para mi formación universitaria y tesis, me mostraron una parte hermosa de mi carrera y ayudaron en desarrollarme laboralmente y como persona, Kimberly Sanchez y Sandra Torres, Carlos Arias, gracias por mostrarme lo que sabían y por invitarme a ser y sentirme parte, gracias a ustedes se realmente mi pasión, realmente gracias.



# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1. Situación actual y logística de última milla . . . . .	3
1.2. Vehículos eléctricos . . . . .	4
1.2.1. Oferta de camiones eléctricos . . . . .	6
1.2.2. Oferta de cargadores . . . . .	8
1.3. Barreras operativas en la incorporación de EVs . . . . .	8
1.4. Matriz energética . . . . .	10
1.4.1. Matriz en Chile . . . . .	10
1.4.2. Cobros energía eléctrica en Chile . . . . .	12
1.4.3. Matriz en México . . . . .	13
1.4.4. Cobros energía eléctrica en México . . . . .	14
1.5. Emisiones . . . . .	14
1.5.1. Emisiones locales . . . . .	15
1.5.2. Emisiones globales . . . . .	16
1.6. Costo total de propiedad (TCO) . . . . .	16
<b>2. Metodología</b>	<b>18</b>
<b>3. Condiciones del análisis operativo</b>	<b>20</b>
3.1. Condiciones operativas . . . . .	20
<b>4. Análisis técnico</b>	<b>26</b>
4.1. Vehículos disponibles . . . . .	26
4.2. Infraestructura de carga . . . . .	28
4.3. Cálculo de emisiones . . . . .	33
<b>5. Análisis económico</b>	<b>38</b>
5.1. Análisis de sensibilidad . . . . .	41
5.2. Proyección del TCO . . . . .	41
<b>6. Resultados finales y discusión</b>	<b>45</b>
6.1. Resultados del análisis técnico . . . . .	45
6.2. Resultados de emisiones en camiones eléctricos . . . . .	46
6.3. Resultados del análisis económico . . . . .	46



7. Mejoras y estudios aplicables al proyecto	48
Bibliografía	49

# Índice de Tablas

1.1. Clases de camiones por peso . . . . .	6
1.2. Camiones eléctricos actuales en el mercado . . . . .	7
1.3. Detalle parametros TCO usados . . . . .	17
3.1. Camiones diesel en operación analizados para el cliente 1 . . . . .	22
3.2. Camiones diesel en operación analizados para el cliente 2 . . . . .	24
4.1. Energía requerida, potencia de carga y tiempo de carga por camión para cliente 1	29
4.2. Energía requerida, potencia de carga y tiempo de carga por camión para cliente 2, camiones de 12-13 ton . . . . .	29
4.3. Energía requerida, potencia de carga y tiempo de carga por camión para cliente 2, camiones de 5 ton . . . . .	29
4.4. Dimensionamiento de cargadores para cliente 1. . . . .	30
4.5. Dimensionamiento de cargadores para cliente 2, camiones de 12-13 ton. . . . .	30
4.6. Dimensionamiento de cargadores para cliente 2, camiones de 5 ton. . . . .	31
4.7. Carga eléctrica máxima a la red del cliente 1 producto de la carga de camiones de 12 ton. . . . .	31
4.8. Carga eléctrica máxima a la red del cliente 2 producto de la carga de camiones de 12-13 ton. . . . .	31
4.9. Carga eléctrica máxima a la red del cliente 2 producto de la carga de camiones de 5 ton. . . . .	31
4.10. Litros necesarios para la operación, cliente 1 . . . . .	34
4.11. Litros necesarios para la operación, cliente 2 . . . . .	34
4.12. Energía requerida anual por el cliente 1 según camión eléctrico . . . . .	35
4.13. Energía requerida anual por el cliente 2 según camión eléctrico de 12-13 ton .	35
4.14. Energía requerida anual por el cliente 2 según camión eléctrico de 5 ton . . . . .	35
4.15. Factor de contaminación diesel, matriz chilena y matriz mexicana . . . . .	35
4.16. Emisiones de $CO_2$ de la operación ICE, cliente 1 . . . . .	36
4.17. Emisiones de $CO_2$ de la operación ICE, cliente 2 . . . . .	36
4.18. Emisiones de $CO_2$ de la operación EV, cliente 1 . . . . .	36
4.19. Emisiones de $CO_2$ de la operación EV, cliente 2, camiones de 12-13 ton. . . . .	36
4.20. Emisiones de $CO_2$ de la operación EV, cliente 2, camiones de 5 ton. . . . .	37
5.1. Detalle parametros TCO de clientes . . . . .	39
5.2. Resultados TCO Cliente 1 . . . . .	40
5.3. Resultados TCO Cliente 2, flota 1, camiones de 12 ton . . . . .	40
5.4. Resultados TCO Cliente 2, flota 2, camiones de 5 ton . . . . .	40



# Índice de Ilustraciones

1.1.	Última milla en el flujo de la cadena de suministros . . . . .	4
1.2.	Componentes principales de un vehículo eléctrico [1] . . . . .	5
1.3.	Tipos de cargadores para vehículos eléctricos [2] . . . . .	8
1.4.	Porcentaje y capacidad instalada de generación eléctrica bruta en el sistema nacional en MW [3] . . . . .	11
1.5.	Porcentaje de la generación eléctrica bruta en el sistema nacional en MWh [3]	13
1.6.	Tarifa para uso doméstico en México . . . . .	14
2.1.	Diagrama de flujo de la metodología para la actual tesis . . . . .	19
3.1.	Mapa Centros de operación dimensionados para el cliente 1 . . . . .	21
3.2.	Climograma Santiago . . . . .	22
3.3.	Mapa de operación dimensionados para el cliente 2 . . . . .	23
3.4.	Climograma Ciudad de México . . . . .	24
3.5.	Perfil topológico de ruta para dimensionamiento cliente 1 . . . . .	25
3.6.	Perfil topológico de ruta para dimensionamiento cliente 2 . . . . .	25
4.1.	Perfil de carga diario estimado para el cliente 1. . . . .	32
4.2.	Perfil de carga diario estimado para el cliente 2, camión de 12 ton. . . . .	32
4.3.	Perfil de carga diario estimado para el cliente 2, camión de 5 ton. . . . .	33
5.1.	Proyección del TCO, cliente 1 . . . . .	42
5.2.	Diferencia porcentual del TCO, cliente 1 . . . . .	42
5.3.	Proyección del TCO, cliente 2, camión de 12 ton . . . . .	43
5.4.	Diferencia porcentual del TCO, cliente 2, camión de 12 ton . . . . .	43
5.5.	Proyección del TCO, cliente 2, camión de 5 ton . . . . .	44
5.6.	Diferencia porcentual del TCO, cliente 2, camión de 5 ton . . . . .	44



# Introducción

## Motivación

La logística y el transporte representa un sector clave en la economía global y es un contribuidor importante en el progreso social y económico en las sociedades modernas, pero un gran porcentaje del petróleo consumido en los países es usado para transporte, más aún, el transporte por calles representó el 30.9% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) el 2016 en Chile.[4]

Para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> se pueden ocupar tecnologías cero emisiones para logística y transporte, como el uso de vehículos eléctricos en las flotas de vehículos en empresas, que están incentivados por distintas variables como i) compañías que reciben incentivos para reducir su huella de carbono; ii) alta variabilidad del precio del petróleo; iii) subsidios del estado; iv) competitividad económica de nuevas tecnologías (como vehículos eléctricos), esta última variable es importante en la toma de decisiones de las empresas.

Este estudio de factibilidad técnico-económico representa una base teórica para la implementación de prácticas a nivel gubernamental, industrial y corporativo en usos de nuevas tecnologías que sean sustentables y sostenibles, promoviendo el uso de energías limpias y mejoras tanto operativas, económicas y de calidad de vida.

## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica-económica en uso de camiones eléctricos en logística de última milla.

### Objetivos específicos

1. Determinar la oferta actual de camiones eléctricos en relación a características críticas operacionales.
2. Determinar la potencia eléctrica en la infraestructura de carga para camiones eléctricos propuestos.
3. Calcular la diferencia de emisiones de CO<sub>2</sub> entre la flota actual de camiones diesel y la flota propuesta de camiones eléctricos.

4. Calcular la diferencia de TCO entre flotas de camiones eléctricos y diesel.

## Alcances

- La investigación estará basada en 2 clientes de ENGIE (de ahora en adelante, "la empresa"), que son generadores carga que requieren logística de última milla, la cual la empresa brindará la información necesaria para el desarrollo de la actual tesis.
- En el cálculo de emisiones solo se calculará la emisión del  $CO_2$  en una combustión completa para la operación (en operación y carga), debido a la alta variabilidad de condiciones de operación. También solo se verán emisiones en la generación energética necesaria para las flotas eléctricas y la emisión por operación en la flota diesel.
- No se considerará la opción de *battery swap* en el análisis.
- La carga y la descarga del estado de carga de los camiones (SoC) son caracterizadas de manera lineal, junto a la disminución de CAPEX anual de camiones debido a una disminución de costos de batería anual proyectada.
- No se analizarán los vehículos a hidrógeno en esta tesis, debido que a pesar que se consideren vehículos eléctricos, la naturaleza del vehículo es distinta, requiriendo otras consideraciones de infraestructura de carga y tiempos de carga comparados con camiones eléctricos puros.
- Debido a la naturaleza de la empresa, datos como por ejemplo el nombre de los clientes y/o nombres de proveedores podrían ser cambiados a nombres genéricos o nombres de fantasía.
- La muestra de cálculos del TCO tanto para camiones eléctricos y diesel es restringido al ser propiedad de la empresa.
- La muestra de cálculos de emisiones de  $CO_2$  es restringido al ser propiedad de la empresa.
- La situación actual es variable debido a la actual pandemia del virus COVID-19, esta podría generar variaciones en valores de vehículos analizados.

# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1. Situación actual y logística de última milla

Actualmente se venden más de 60 millones de vehículos al año a nivel mundial, de los cuales existen vehículos a combustión interna, híbridos, eléctricos y a celda de combustible ( $H_2$ ), aunque estos últimos corresponden a un porcentaje ínfimo en el total de ventas actualmente. El segmento de vehículos enchufables (híbridos enchufables y eléctricos puros) representa un 2.7% de las ventas globales. Según proyecciones de Bloomberg NEF, el porcentaje de vehículos eléctricos vendidos será mayor que el de combustión interna para el año 2040 en vehículos de pasajeros y sobre un 30 por ciento en el total de vehículos en las calles. [5]

La logística de última milla es el último eslabón de la planificación de transportes en la cadena de suministros, siendo parte de la distribución, siendo descrito como el transporte de objetos de un centro a un destino final como se puede ver representado en la figura 1.1. Última milla es una frase repetitiva en el mundo del courier, debido a la transición del modelo B2B (negocio a negocio) a B2C (negocio a consumidor), siendo la logística de última milla de gran impacto económico, llegando hasta ser un 41% del costo total de transporte [6], por lo que la reducción de costos y mejora en la eficiencia han sido claves.

El 2018, Chile tenía 217.173 camiones en sus carreteras según el Instituto nacional de estadísticas. Del total de camiones el 32.5% tubo un tonelaje entre 1.7 y 10 toneladas, siendo dos toneladas menor al máximo de toneladas usado en logística de última milla, siendo un porcentaje relevante de los camiones usados para transporte en Chile [7].

El e-commerce ha sido un punto importante en el control de la última milla en Chile, siendo sobrepasado por la cantidad de ventas online provocado por la actual pandemia del COVID-19, superando el 214% de las ventas usuales según datos de Transbank, por lo que la logística ha tomado un rol fundamental en la actualidad y futuro para el comercio [8].





Figura 1.1: Última milla en el flujo de la cadena de suministros

En Chile, la mayoría de los generadores de carga, o sea, grandes empresas que requieren mover grandes cantidades de objetos o personas, han optado por tercerizar la logística necesaria para dichos fines, debido que esta modalidad de negocio permite una disminución de costos y tiempos, se requiere una inversión relativamente pequeña o nula, permite que el generador de carga se enfoque en su negocio y flexibiliza el negocio al no tener que administrar activos fijos. [9] Usualmente esta tercerización de la logística se lleva a cabo mediante contratos por cierto horizonte de tiempo entre la empresa logística y el generador de carga.

Debido a su naturaleza, la logística de última milla opera principalmente en ciudades, desde los centros de distribución al consumidor u destino final, por lo que las emisiones de gases invernadero (GEI) son un obstáculo en ciertos sectores de la ciudad, que tienen mayores restricciones de emisiones vehiculares tal como es el caso de Santiago [10] y Ciudad de México [11].

## 1.2. Vehículos eléctricos

Un vehículo eléctrico o EV tienen un motor eléctrico en vez de uno a combustión, junto con un paquete de baterías que le entrega la energía necesaria para poder funcionar y deben ser cargadas regularmente en estaciones de recarga. Debido que funcionan por electricidad, estos vehículos no generan emisiones de manera local, quitando por completo la necesidad de un tubo de escape.

Los componentes claves de un EV son [1]:

- Batería (auxiliar): entrega energía a los accesorios del vehículo
- Puerto de carga: permite la conexión entre el vehículo y el cargador externo.
- Convertidor DC/DC: convierte la potencia eléctrica de alto voltaje de la batería tractora a bajo voltaje para su uso en los accesorios del vehículo.
- Motor eléctrico: usa la electricidad de la batería tractora para dar movimiento a las ruedas. Algunos vehículos ocupan este motor tanto para función de impulsar y regenerar al frenar.
- Cargador abordo: convierte la corriente alterna (AC) del cargador a corriente continua (DC) para recargar la batería tractora. Este monitorea características de la batería

como el voltaje, corriente, temperatura y estado de carga (SoC) al momento de cargar.

- Controlador: maneja el flujo de energía eléctrica de la batería tractora al motor eléctrico, controlando velocidad y torque producido.
- Sistema de refrigeración: mantiene a temperaturas óptimas el sistema eléctrico, batería tractora, motor y otros componentes.
- Batería tractora: almacena la energía para impulsar el vehículo.
- Transmisión: transfiere la energía mecánica del motor a las ruedas.

Un punto importante dentro del peso del vehículo es la batería, debido a la baja densidad energética de la batería producto de la química de producción de esta. (hasta 246 Wh/kg en el tesla modelo 3, uno de los mas densos energéticamente), representando cerca del 25 % del peso total del vehículo. [12] El costo de las baterías también es importante al momento de evaluar la factibilidad de estos vehículos, ya que representan un costo importante del vehículo. Según bloombergNEF, el valor de las baterías han disminuido un 87 % entre el 2010 y el 2019, desde 1100 USD/kWh hasta 156 USD/kWh. Se espera que cuando la demanda acumulada sobrepase los 2TWh a nivel mundial el año 2024, el valor de la batería disminuya a cerca de 100 USD/kWh, el cual es el precio en que el EV tendría un valor similar a su contraparte de combustión interna. [5]

En relación a la carga del vehículo, se puede tener carga rápida o carga lenta, dependiendo del vehículo y sus prestaciones. Esto es abordado en detalle en la sección de oferta de cargadores

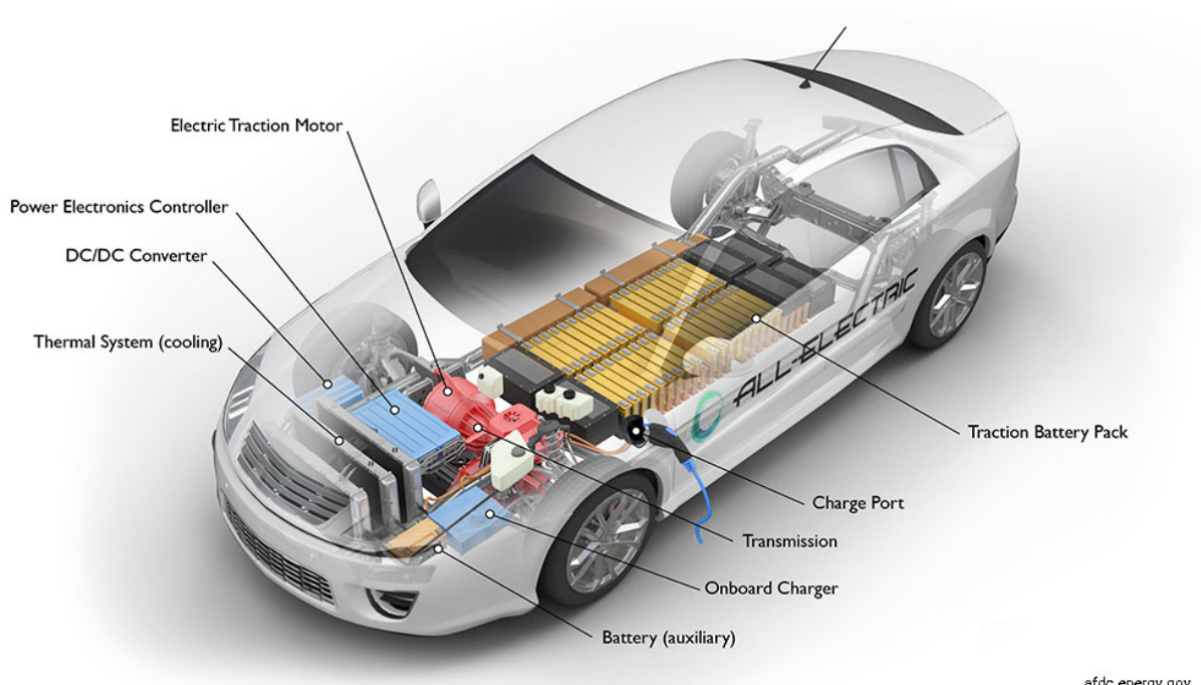


Figura 1.2: Componentes principales de un vehículo eléctrico [1]

### 1.2.1. Oferta de camiones eléctricos

Actualmente los camiones son los vehículos usados en la logística de última milla, siendo clasificados según su peso por la Administración federal de autopistas (FHDA) [13]:

Tabla 1.1: Clases de camiones por peso

Clase	Clasificación	Peso vehicular
Clase 1	Camión liviano	0–2,722 kg
Clase 2a	Camión liviano	2,722–3,856 kg
Clase 2b	Camión liviano	3,856–4,536 kg
Clase 3	Camión mediano	4,536–6,350 kg
Clase 4	Camión mediano	6,351–7,257 kg
Clase 5	Camión mediano	7,258–8,845 kg
Clase 6	Camión mediano	8,846–11,793 kg
Clase 7	Camión pesado	11,794–14,969 kg
Clase 8	Camión pesado	14,969 kg +

La oferta de camiones eléctricos es bastante amplia, abarcando todas las clases de pesos mencionadas anteriormente. Para última milla se suele ocupar de hasta 12 toneladas de carga útil, por lo que camiones en la base del espectro pesado también son usados.

Tabla 1.2: Camiones eléctricos actuales en el mercado

Marca	Modelo	Clase	C.U. (kg)	Autonomia (km)	Batería (kWh)
Daimler	Feightliner eCascadia	Heavy	22000	400	550
Volvo	FE Electric	Heavy	18000	200	300
BYD	T9	Heavy	16300	200	217
Renault	D Z.E.	Heavy	16000	200	200
VW MAN	eTGM	Heavy	15000	190	185
BYD	eTBA	Heavy	13450	300	350
Daimler	Feightliner eM2	Heavy	12000	370	325
DAF	LF	Heavy	12000	220	222
Maxus	ET-1829	Heavy	11690	150	219
Daimler	eActros	Heavy	11650	200	240
Daimler	eFuso One	Heavy	11000	350	300
Renault	D Z.E.	Heavy	11000	300	300
Emoss	EMS 1820	Heavy	10500	190	200
Emoss	EMS 1824	Heavy	10500	230	240
Volvo	FL Electric	Heavy	10500	300	300
BYD	T8	Heavy	10100	300	217
Emoss	EMS 1612	Heavy	10000	125	120
Emoss	EMS 1620	Heavy	9000	210	200
Emoss	EMS 1212	Heavy	6550	150	120
JMC	Conquer BEV	Medium	5500	190	82
Emoss	EMS 1220	Medium	5422	250	200
Emoss	EMS 1008	Medium	5265	100	80
BYD	T7	Medium	5000	200	175
Emoss	EMS 712	Medium	4600	160	120
Daimler	FUSOeCanter	Medium	4290	100	82.8
BYD	T6	Medium	4090	240	120
BYD	T5	Light	2625	250	150
JAC	HFC 1063 EV1	Light	2150	180	83
Renault	Master Z.E.	Light	1620	120	33
MAXUS	EV80	Light	1600	165	56
Spitecar	1.5T Camión 2P	Light	1500	80	38
BYD	T4	Light	1155	200	48.75
BYD	T3	Light	920	250	50.3

C.U. = Carga útil

Hay 3 características esenciales para determinar la viabilidad de un camión eléctrico según necesidades operativas en la última milla: (i) El rango de autonomía ; (ii) La capacidad de carga ; (ii) El tipo de carga. Con esto último es esencial notar que un factor importante es el cargador, ya que el vehículo determina el cargador.

## 1.2.2. Oferta de cargadores

Existen dos tipos de cargadores, los que funcionan con corriente alterna (AC) y los de corriente continua (DC). Usualmente se asocia a una carga lenta a una carga AC y la rápida a la DC, ya que el poder de salida eléctrico del AC es usualmente entre 2 kW a 22 kW debido a limitantes en el transformador a bordo del vehículo por espacio y costos, en cambio DC va desde los 24 kW a potencias superiores a 150 kW [2]. aparte, estos tienen distintos tipos de conexiones, según estándar GB/T, CCS1, CCS2, entre otros mostrados en la figura 1.3

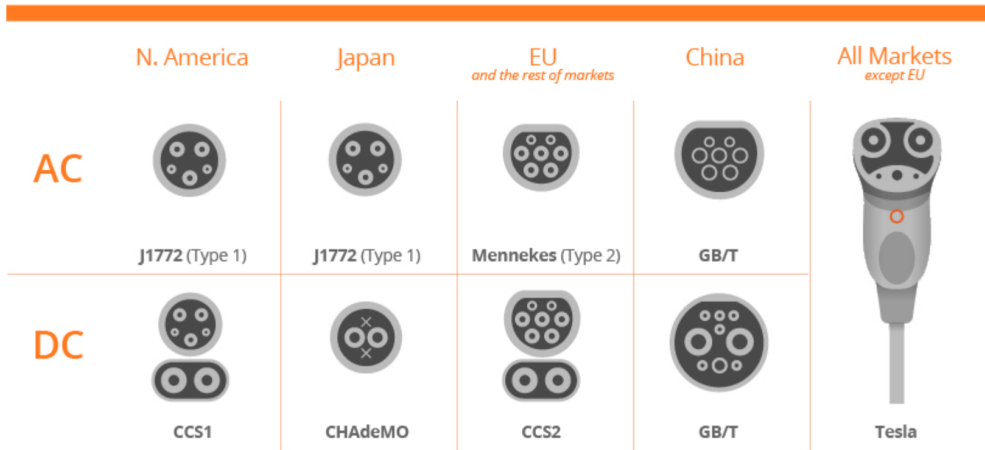


Figura 1.3: Tipos de cargadores para vehículos eléctricos [2]

Los fabricantes de vehículos determinan que tipo de conector para cargador ocupan, esto depende mayormente de la procedencia y potencia de carga, donde este último es esencial en ciertos tipos de operaciones que dependen de una demanda exigente para el vehículo, como trabajo 24/7 o recorrer largas distancias en tramos cortos de tiempo, aunque este último desafío está siendo desarrollado en profundidad con soluciones a hidrógeno por sus periodos de recarga similares a los ICEV, el cual no será evaluado en esta tesis.

## 1.3. Barreras operativas en la incorporación de EVs

Actualmente, los sistemas de transporte y logística tienen flotas basadas en vehículos de combustión interna, la incorporación de vehículos eléctricos trae consigo distintos desafíos desde puntos de vista estratégicos, de planificación y operacionales. Por ejemplo, el aumento de vehículos eléctricos trae consigo la necesidad de estaciones de recarga, por lo que se tienen que tomar decisiones de inversión al momento de decidir el lugar, capacidad y número de estas estaciones. También, el rango máximo de autonomía de estos tipos de vehículos imponen restricciones no triviales al momento de diseñar rutas eficientes.

Juan A. et al [14] identificaron 2 problemas importantes: (i) Problemas relacionados con el ambiente; (ii) Problemas relacionados con la operación, planificación y estrategia asociados a vehículos eléctricos.

En el área ambiental está que las actividades de transporte tienen externalidades, como contaminación acústica, del aire y congestión vehicular. Según Korzhenevych et al. [15],

las actividades del transporte llegan a ser aproximadamente el 8,5% del GDP en regiones como la Unión Europea. Es posible controlar algunos de estas externalidades, por ejemplo las emisiones de CO<sub>2</sub>. Según Figliozzi [16], un vehículo estándar diésel en Europa para transporte emite cerca de 1.0375 kgCO<sub>2</sub>/milla, mientras un vehículo eléctrico (EV) con prestaciones similares emite solo 0,01915 kgCO<sub>2</sub>/milla, una reducción de cerca de 54 veces, junto con bajar la cantidad de decibeles emitidos al ambiente hasta cerca de 10 dB [17], mostrando el impacto positivo que puede traer la masificación de estos vehículos en el transporte de personas y objetos.

En el área de planificación y estrategia existen distintos desafíos en la implementación de los vehículos eléctricos (EV), debido a los aspectos que distinguen los EV de los vehículos de combustión interna (ICEV). Debido a la diferencia de autonomía entre ICEV y EV, estos últimos deben ser cargados regularmente, por lo que los usuarios deben tener en consideración cuantos kilómetros recorrerán antes de la siguiente recarga. Debido a esto, la red de estaciones o electrolinerías son un punto importante a tomar en consideración. Para tomar esta decisión se deben agendar tres variables a determinar: (i) el número y tipo de estaciones; (ii) el lugar de estas estaciones; (iii) la capacidad óptima de estas estaciones.

Una solución es un recambio completo de batería o *battery swap* en inglés, como lo propone Li [18], esto disminuye los tiempos en el que el vehículo está con su carga completa, y durante la noche o en momentos de bajo costo energético se pueden cargar, minimizando el daño en la batería y costo, mejorando el soporte de la red en un lugar centralizado y la capacidad de seguir con el viaje rápidamente con una carga completa.

A pesar que el battery swapping elimina el problema de tiempos de carga excesivos, conlleva otros problemas económicos y logísticos, como el requerimiento de un diseño de batería multimarca y multimodelo, el cual limitaría en gran parte a las marcas de EV en diseñar sus vehículos, junto con limitar a los productores de baterías la flexibilidad e innovación de las mismas. Así mismo se requerirían dos baterías por vehículo, uno en uso y otro cargando, por lo que la mayoría de los clientes preferirían cargar sus propios vehículos, perdiendo el sentido en un recambio de batería. Otro requerimiento sería usar una infraestructura de carga especializada, que no solo sería de mayor costo que un centro de carga convencional, si no que tienen que cargar el segundo pack de baterías de cada vehículo, además de generar ambigüedades en la propiedad de la batería. [19]

Considerando las estaciones de recarga, existe un gran desafío para poder optimizar estos lugares, intentando minimizar costos para el desarrollo de infraestructuras alternativas. Este tipo de "problema de ubicación de electrolinería" podría ser un caso específico del "problema de ubicación de la planta." FLP en sus siglas en inglés. La mayoría de estos problemas se han resuelto con modelos que minimizan el costo promedio de transporte (el problema medio) o minimizan el máximo costo de transporte (el problema de centro), dentro de estos modelos se dividen en basados en nodos, y basados en flujo. En general como el flujo vehicular es similar a un flujo (tal como lo dice su nombre), los problemas tanto de ICEV como de EV se resuelven con modelos de flujo. [20]

La capacidad de estas nuevas estaciones también es un problema no trivial, ya que afecta a la planificación de transporte. Usualmente la capacidad de estas estaciones es limitada, por lo que un número reducido de EVs pueden ser cargados al mismo tiempo, por lo que el

tiempo de carga, la capacidad y la espera son problemas importantes en las estaciones de recargas de EV tal como lo menciona la literatura de Hosseini y MirHassani [21] que es uno de los pocos trabajos en considerar todas estas variables.

En el área operacional se ve un problema económico, debido que no es fácil determinar si la tecnología de EV es sostenible para ciertas actividades de transporte de manera económica. Existen distintas bases de trabajo para proyectar este tipo de impacto económico, uno de ellos es de Chocteau et al. [22] usa una base de teoría de juegos para estudiar el valor de la cooperación entre actores como el controlador de flota, el productor de vehículos y el generador de electricidad.

La infraestructura, los tiempos de carga y posibles cambios de batería son restricciones no menores al momento de observar la red de carga para EVs, los que tienen que tener 4 principios básicos: (i) cerca de áreas con alto volumen de tráfico; (ii) lugares de alta visibilidad para crear conciencia; (iii) en lugares accesibles personas que están comprando su primer vehículo eléctrico; [23] (iv) capacidad de la red eléctrica.

La planificación de ruta es sumamente importante al momento de hablar de EVs, debido a su rango limitado de distancia con una sola carga y su tiempo de recarga, la infraestructura, entre otros. El rango estimado de la mayoría de los EVs es de 150-250 kilómetros [24], que puede bajar considerablemente con temperaturas bajas y el llamado ansiedad de rango [25]

## 1.4. Matriz energética

Los EVs se recargan conectándose a la red de electricidad, requiriendo de la matriz energética para poder obtener su energía. El término "matriz energética" se refiere a la combinación de las diversas fuentes de energía primaria utilizadas para satisfacer las necesidades energéticas en una región geográfica determinada. Incluye los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), la energía nuclear y las numerosas fuentes de energía renovable (madera y otras bioenergías, hidráulica, eólica, solar y geotérmica). Estas fuentes de energía primaria se utilizan, por ejemplo, para generar energía eléctrica, suministrar combustible para el transporte y sistemas de climatización de edificios residenciales e industriales. [26]

### 1.4.1. Matriz en Chile

Chile es un país esbelto, con una longitud de 4270 km de norte a sur y un ancho promedio de 177 km, con una demografía concentrada en la región metropolitana con una población de 7.3 millones de personas, representando el 41.5% de la población del país, junto a una gran industria minera presente en el norte del país. [27] El SEN tiene casi 36 mil km de extensión, Esta geografía, demografía e industria está estrechamente ligada en la formación de sistemas independientes eléctricos. Chile tiene

El sistema eléctrico de Chile está compuesto por tres sistemas independientes; El SEN (sistema eléctrico nacional), el SEA (sistema eléctrico de Aysen) y SEM (sistema eléctrico de Magallanes). [28]

- SEN (sistema eléctrico nacional): Está compuesto por dos antiguos sistemas eléctri-

cos, el SIC (Sistema interconectado central) y el SING (sistema interconectado norte grande). El SEN el 2019 contó con una capacidad instalada de 25.248 MW.

- SEA (sistema eléctrico de Aysen): Este sistema abastece la región de Aysen del General Carlos Ibañez del Campo, el año 2017 contó con una capacidad instalada de 62 MW.
- SEM (sistema eléctrico de Magallanes): Este sistema abastece la región de Magallanes y Antártica Chilena, el año 2017 contó con una capacidad instalada neta de 104 MW.

El sistema eléctrico nacional es el sistema independiente mas grande de Chile, teniendo este un 99.35 % de la potencia nacional instalada abasteciendo a cerca de 17.3 millones de personas, en cambio el SEA y SEM tienen un 0.24 % y 0.41 % de la potencia nacional instalada respectivamente, abasteciendo entre ambos a cerca de 273 mil habitantes.

Cerca del 51 % de la fuente energética de Chile es en base a combustibles fósiles (gas natural, petróleo diesel y carbón), generando una huella de carbono al momento de la producción de energía, la cual puede ser asociada a una cantidad de energía ocupada en la matriz para electrificar distintos artefactos, industrias o en este caso, vehículos eléctricos. El sistema eléctrico nacional (SEN) tiene una tasa de 0,4056 tCO<sub>2</sub>eq/MWh [29].

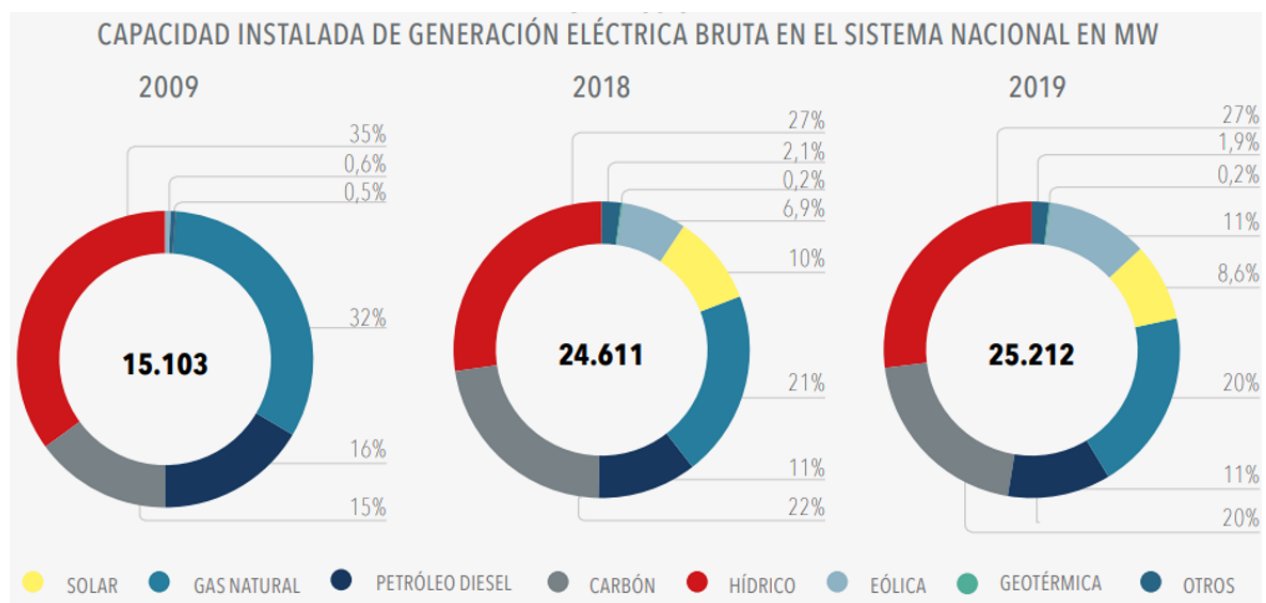


Figura 1.4: Porcentaje y capacidad instalada de generación eléctrica bruta en el sistema nacional en MW [3]

Chile es un país dependiente energéticamente al carecer de grandes reservas de recursos no renovables, siendo estos necesarios para mas de la mitad de la energía instalada en el SEN, por lo que se ha incentivado la generación de electricidad renovable en Chile, debido al gran potencial fotovoltaico que se presenta fuertemente en el norte del país. [30]

Los principales incentivos a la generación eléctrica renovable en Chile son la ley para el incentivo de generación renovable y el plan de descarbonización existentes:



- Ley 21.118: Esta ley incentiva el desarrollo de generadoras residenciales y hace aplicable sus disposiciones a todos los sistemas eléctricos del país. En esta ley menciona que aquellos usuarios sujetos a fijación de precios que dispongan para su propio consumo de equipamiento de generación de energía eléctrica por medios renovables no convencionales o de instalaciones de cogeneración eficiente, sea de manera individual o colectiva, tendrán derecho a inyectar energía a la red de distribución, pudiendo ser descontada de los cargos por suministro eléctrico en la facturación correspondiente. [31]
- Plan de descarbonización: Primeramente surge del acuerdo voluntario entre el Ministerio de Energía y las empresas generadoras eléctricas Aes Gener, Colbún, Enel y Engie. En una primera etapa, hasta el año 2024, serán cerradas ocho centrales termoeléctricas, las más antiguas del país, ubicadas en las comunas de Iquique, Tocopilla, Puchuncaví y Coronel. La Estrategia finalmente considera el cierre total de las 28 centrales termoeléctricas para el 2040. [32]

Estos incentivos son importantes para la implementación sustentable y sostenible de vehículos eléctricos libres o con una reducción significativa de emisiones de GEI en relación a su contraparte diesel o a gasolina, pudiendo suministrar energía realmente verde a estos medios de transporte, junto con disminuir el costo marginal en la matriz eléctrica. [33]

### 1.4.2. Cobros energía eléctrica en Chile

La legislación vigente en Chile establece como premisa básica que las tarifas de energía eléctrica deben representar costos reales de generación, transmisión y distribución. Los usuarios finales con menos de 500kW de potencia son considerados sectores donde las características del mercado son de monopolio natural, por lo que se establece una regulación del precio y por ende, son considerados clientes regulados, sin embargo, clientes finales con potencias superiores a 5MW son considerados como clientes con capacidad negociadora, pudiendo optar por autogeneración o un suministro directo de empresas generadoras, denominándose clientes libres por su libertad de precios. Todo cliente que esté entre 500 MW y 5MW

Los costos de distribución son los siguientes:

Cobros de suministro:

- Cargo fijo por boleta
- Cargo energía [ $\$/kWh$ ]
- Cargo suministro en alta demanda [ $\$/kW$ ]
- Cargo máxima demanda [ $\$/kW$ ]
- Cargo por uso de servicio público [ $\$/kWh$ ]
- Otros cargos [ $\$/kWh$ ]
- Cargo de transmisión [ $\$/kWh$ ]

Cobros de peajes:

- Cargo peaje energía [ $\$/kWh$ ]
- Cargo peaje suministro en alta demanda [ $\$/kW$ ]
- Cargo peaje máxima demanda [ $\$/kW$ ]

### 1.4.3. Matriz en México

En México, la generación energía eléctrica se considera un rubro estratégico, y la constitución lo establece como propiedad federal, salvo contratos de servicio específicos. Toda la transmisión y distribución eléctrica del país es controlada por La Comisión Federal de Electricidad (CFE) es quien controla esencialmente todo el sector eléctrico. CFE entrega energía al 100 % de las personas en México, osea a cerca de 127 millones de personas [34], contando con 108.018 km de transmisión de alto y mediano voltaje el año 2018 [35].

Más del 65 % de la energía producida en México es de fuente no renovable, tal como se observa en la imagen 1.5, siendo casi el 90 % de esta producida por termoeléctricas de ciclo combinado. [36] El sistema eléctrico mexicano tiene una tasa de 0.505 tCO<sub>2</sub>eq/MWh [37]

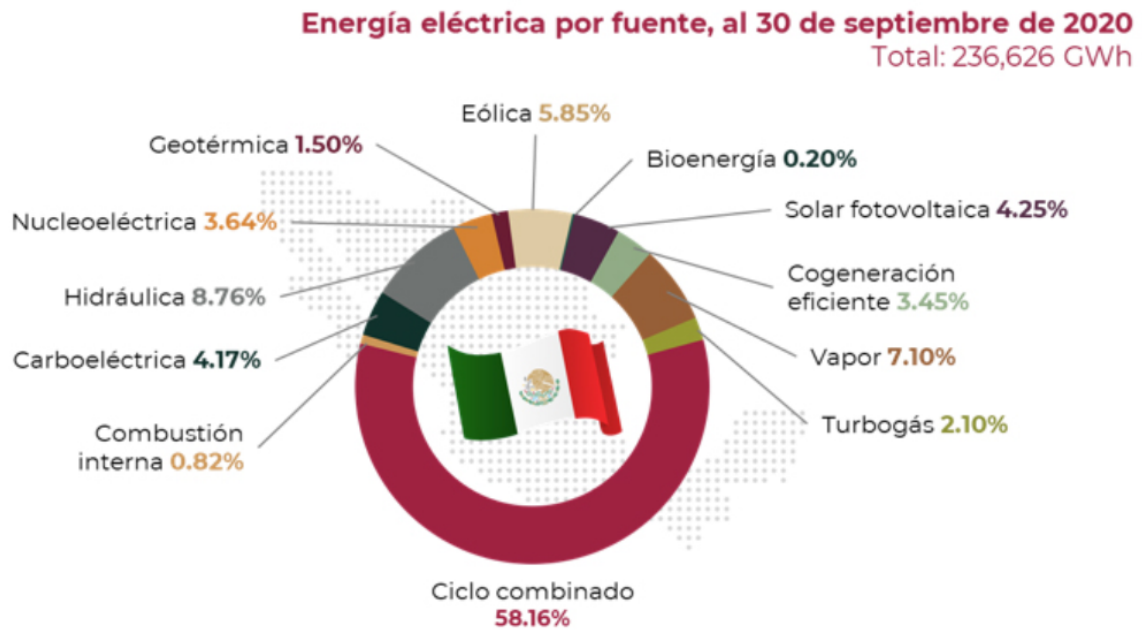


Figura 1.5: Porcentaje de la generación eléctrica bruta en el sistema nacional en MWh [3]

México, al igual que Chile, tiene planes importantes de descarbonización, tal como se ve en la Ley de transición energética (LTE), publicada en el diario oficial de México el 2 de febrero del 2020, el cual tiene por objetivo regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos, basado en objetivos a mediano y largo plazo, para los años 2035 y 2050 respectivamente.[36]

#### 1.4.4. Cobros energía eléctrica en México

En México, el cobro de la energía eléctrica cuenta con subsidio federal para aplicaciones domesticas, pero luego de superar cierta cantidad de energía consumida en el mes pierde este subsidio. Esencialmente este subsidio existe debido que en los lugares con mayor temperatura media mensual mínima en verano, se usa en mayor cantidad distintos electrodomésticos como refrigeradores, congeladores y sistemas de aire acondicionado debido a las altas temperaturas.

Las tarifas con subsidio son la 1, de la letra A hasta la F, ordenadas por temperatura media mensual mínima en verano, tal como se observa en la figura 1.6. Una vez superado la cantidad de energía en el mes, la tarifa cambia al mes siguiente a una tarifa DAC (tarifa de alto consumo), el cual no tiene subsidio, pudiendo ser hasta 350 % mas costosa que la tarifa 1 correspondiente.

TARIFA	Temperatura media mensual mínima en verano	TARIFA	LÍMITE PARA APLICACIÓN DE LA TARIFA DAC
1	<25°C	1	250 KWh/mes
1A	25°C	1A	300 KWh/mes
1B	28°C	1B	400 KWh/mes
1C	30°C	1C	850 KWh/mes
1D	31°C	1D	1,000 KWh/mes
1E	32°C	1E	2,000 KWh/mes
1F	33°C	1F	2,500 KWh/mes

Figura 1.6: Tarifa para uso doméstico en México

Para el caso de tarifas específicas se encuentran tarifas para alumbrado público en baja tensión, alumbrado público en media tensión, riego agrícola en baja tensión y riego agrícola en media tensión, siendo estas las APBT, APMT, RABT y RAMT respectivamente.

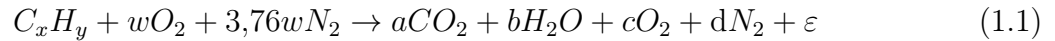
También están las tarifas generales de baja tensión, siendo estas de pequeña demanda (PDBT, menor a 25 kW-mes) y gran demanda (GDBT, sobre 25 kW-mes), junto con la tarifa general en media tensión ordinaria (GDMTO, menor a 100kW en el máximo de demanda) y general de media tensión horaria (GDMTH, mayor a 100kW en el máximo de demanda).

Finalmente están las tarifas creadas entre un generador de carga importante (minera, industria grande) que son internas entre la empresa suministradora de energía y la generadora de carga, sistema similar al de cliente libre en Chile.

### 1.5. Emisiones

El transporte actual está basada en motores de combustión interna, vehículos que emiten varios tipos de gases y partículas que contaminan el medio ambiente, de los cuales los que se emiten en mayor cantidad son: óxidos nitrosos (NOx), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2), compuestos orgánicos volátiles y también macropartículas, estos dependen de

la cantidad de oxígeno en el aire, la relación oxígeno/combustible, la temperatura, la presión de combustión, entre otros. La ecuación que rige este fenómeno es:



Donde  $w, a, b, c$  y  $d$  representan coeficientes molares que dependen del reactivo de hidrocarburo específico y la cantidad de aire presente, los reactivos  $wO_2 + 3,76wN_2$  representan aire de ingeniería y  $\varepsilon$  representa energía. Sin embargo, en la práctica, el dióxido de carbono, el nitrógeno y el oxígeno no son los únicos productos de combustión. Especies como el óxido nítrico ( $NO$ ), el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y el monóxido de carbono ( $CO$ ) también son productos comunes de la reacción y se pueden encontrar en los gases de escape de los motores de combustión interna. [38]

Es importante el cálculo de estos gases debido que son gases de efecto invernadero, ya que absorben y emiten radiación dentro del espectro infrarrojo, estas son devueltas en todas direcciones, una parte de ella es devuelta a la superficie terrestre y a la atmósfera inferior, generando un aumento de la temperatura superficial media respecto a lo que habría en la ausencia de estos gases.[39]

Los EV pueden ser sustentables en términos ambientales de manera local debido que no generan una emisiones, pero están asociados emisiones de gases a nivel global debido a su necesidad de recarga de electricidad de la red eléctrica. Dentro de estas emisiones, la más importante es el  $CO_2$  debido a la concentración que existe este actualmente en la atmosfera.

### 1.5.1. Emisiones locales

Las emisiones a nivel local se refiere directamente al uso urbano una vez desconectado de la fuente de energía (productora de diésel o de electricidad). Emisiones a nivel global está asociado a la producción de esa energía (como por ejemplo las generadoras de electricidad).

Estas emisiones son causados por la operación del vehículo, o sea, su uso en el lugar de trabajo, el cual podría ser un sector urbano para el transporte público, por ejemplo. Para el EV se asume como un valor 0 debido que no emiten emisiones de gases al estar en operación, en cambio los vehículos de combustión interna si emiten gases tal como es explicado anteriormente, el valor de emisión local es superior a 0 debido a su naturaleza.

Para el cálculo de la cantidad de  $CO_2$  por litro de combustible gastado, en este caso, de diésel y gasolina se tiene lo siguiente [40]:

- Diesel: 1 litro de diésel pesa 835 gramos. El diésel consiste en 86,2% de carbono o 720 gramos de carbono por cada litro de diésel. Para combustionar el carbono a  $CO_2$  se necesitan 1920 gramos de oxígeno, dando una suma de  $720 + 1920$  (carbono + oxígeno) = 2640 gramos de  $CO_2$  por litro de diésel.
- Gasolina: 1 litro de gasolina pesa 750 gramos. La gasolina consiste en un 87% de carbono o 652 gramos de carbono por litro de gasolina. Para combustionar el carbono a  $CO_2$  se necesitan 1740 gramos de oxígeno, dando una suma de  $652 + 1740 = 2392$

gramos de  $CO_2$  por cada litro de gasolina.

Debido a la naturaleza variable de la realidad, la cual es compleja de modelar para generalidades, se asumirá una reacción completa al momento de realizar el cálculo de las emisiones de  $CO_2$  para ICEV en esta tesis.

### 1.5.2. Emisiones globales

La emisión a nivel global, al estar asociado con las generadoras de electricidad, están fuertemente ligados a la matriz energética de la cual se alimenta. Como ya fue mencionado, existe una cantidad de  $CO_2$  asociado a una cantidad de energía eléctrica generada, por lo que la recarga actual de EVs en la matriz eléctrica, a pesar que es hasta 54 veces menos contaminante que el uso de ICEV [16], no es libre de contaminantes. Este tipo de emisión, al estar relacionado con la matriz energética de cada país, se tomó un factor de emisión de  $CO_2$  correspondiente a cada país.

## 1.6. Costo total de propiedad (TCO)

El Costo total de propiedad (TCO) es un indicador financiero para poder conocer los costos directos e indirectos útiles para conocer el valor de inversión de un proyecto o compra. Este indicador ha mostrado los beneficios al largo plazo de los EV por sobre los ICEV debido al bajo costo de mantención, a pesar de tener una inversión inicial superior. Este valor se calcula de la siguiente manera: [41]

$$TDCO = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{CT_t}{(1+r)^t} \quad (1.2)$$

Donde:

- $TDCO$  = costo total descontado de propiedad.
- $CT_T$  = costes totales de propiedad
- $t$  = periodo de tiempo
- $r$  = tasa de descuento o coste del capital
- $n$  = periodo de renovación/retirada

Debido que el cálculo de costos puede ser extenso, se limitará a realizar el cálculo del TCO con las siguientes variables:

Tabla 1.3: Detalle parametros TCO usados

Detalle	Unidad	Indicador
Costo vehículo actual	[USD]	CAPEX
Cantidad de vehículos en la flota	[n]	CAPEX
Costo del vehículo eléctrico	[USD]	CAPEX
Costo del cargador	[USD]	CAPEX
Tasa Lease de compra vehículo diesel	[%]	Económico
Horizonte de evaluación flota	[Años]	Económico
Tasa de descuento del cliente	[%]	Económico
Rendimiento vehículo diesel	[km/lt]	OPEX
Costo de mantenimiento vehículo diesel	[USD/km]	OPEX
Distancia recorrida por vehículo diesel	[km/año]	OPEX
Eficiencia cargador + transformador	[%]	OPEX
Costo mantenimiento de infraestructura	[USD]	OPEX
Costos de distribución y facturación	[USD]	OPEX
Precio energía	[USD/MWh]	OPEX
Valor diesel	[USD]	OPEX
CPI	[%]	OPEX
Tasa lease eléctrico	[%]	OPEX
Rendimiento vehículo eléctrico	[kWh/km]	OPEX
Costo mantención eléctrico	[USD/km]	OPEX

# Capítulo 2

## Metodología

Para realizar esta tesis, es necesario tener varios elementos físicos. La secuencia cronológica a seguir se puede observar en la figura 2.1, los elementos y acciones a realizar son mencionados a continuación:

- Definición de condiciones operacionales: Se realizará la recopilación de información y datos actuales de la operación logística de última milla en 2 clientes de Engie. Se obtendrá esta información mediante reuniones con clientes de Engie e información interna de Engie obteniendo kilómetros recorridos al día, rutas, cantidad de vehículos usados actualmente y su costo, costos de combustible, costos de operación y mantenimiento.
- Análisis técnico: Se realizarán los análisis de la información de los operadores logísticos para determinar la factibilidad operativa de camiones eléctricos en dichas operaciones, a partir de la cual se evaluará el tamaño de la batería, requerimientos de carga, tasa de aceptación de la batería, volumen de energía consumida y potencia requerida. De la misma manera se realizará el cálculo de emisiones de  $CO_2$  considerando emisiones locales y provenientes del sistema eléctrico del país correspondiente. Para estos efectos se utilizarán plantillas de cálculo de Excel de propiedad de la empresa.
- Análisis económico: Se realizarán los análisis de la información de CAPEX y OPEX de las generadores de carga y operadores logísticos considerando data informada en etapa de definición de condiciones operacionales para evaluar la factibilidad económica de los camiones eléctricos en dichas operaciones, se consideran además inversiones asociadas a camiones eléctricos y la infraestructura de carga requerida (proyecto eléctrico, cargadores, transformadores) y gastos operacionales relacionados con la mantención de camiones, infraestructura y costos de energía. Para estos efectos se utilizarán hojas de cálculo de Excel de propiedad de la empresa, en la cual se realizarán los cálculos para obtener el TCO. También se realizarán sensibilidades en variables importantes y proyecciones.
- Resultados y discusión: Se expondrán los resultados generales mas importantes para ambos clientes, resumiendo las diferencia entre flotas de camiones eléctricos y camiones a combustión interna diesel a nivel técnico y económico, mostrando también su dife-

rencia en emisiones de  $CO_2$ , junto con discutir y comentar sobre los valores calculados.

- Trabajo propuesto y conclusiones: se sintetizará las reflexiones de la presente tesis, junto con proponer siguientes pasos de nuevas problemáticas encontradas.

Dentro del análisis económico, el TCO se limitará a analizar los parámetros expuestos en la tabla 1.3

La recopilación de condiciones operativas se realizará mediante entrevistas y reuniones con generadores de carga y operadores logísticos, los cuales definirán el tamaño de la flota y condiciones de operación. El análisis de la sección técnica se realizará en base a la evaluación entre los requerimientos actuales del cliente para la operación (km recorridos al día, potencia requerida, volumen/capacidad de carga del camión) y la oferta actual de camiones eléctricos, para esto se compararán las características entre el camión usado actualmente, el eléctrico y lo requerido por el cliente. Dentro de la redacción de la tesis se ocupará el programa en línea *Overleaf*, basado en Latex. Las correcciones finales de la redacción se realizarán en el programa mencionado.



Figura 2.1: Diagrama de flujo de la metodología para la actual tesis



# Capítulo 3

## Condiciones del análisis operativo

### 3.1. Condiciones operativas

Con el fin de conocer las condiciones actuales operativas, se realizó distintas instancias de encuentro con cada cliente de Engie de manera online, las cuales mostraron el tipo de camión ocupado actualmente, entregando la información de marca, modelo, volumen por modelo, costo de mantención por km, combustible consumido por mes, distancia recorrida por mes de la operación. A continuación se muestran las condiciones operativas por cliente:

Cliente 1: El cliente tiene una operación logística relacionada con el transporte de bebestibles, siendo un factor importante ya que el volumen útil del camión es inclusive mas relevante que la capacidad total de carga en kg. Los camiones evaluados para el cliente 1 fueron camiones diesel de las marcas Mercedes Benz y Freightliner, de entre 10 y 12 toneladas de carga útil, los costos de mantención se entregaron desglosados a la empresa en 2 categorías: costos de mantención preventivo y correctivo los cuales fueron sumados para entregar un costo de mantenimiento final por kilometro. También se recibió la información del gasto en combustible mensual por camión y la distancia recorrida mensual, logrando obtener rendimientos y kilometraje anual, los cuales se muestran en la tabla 3.1.

Es necesario mencionar que a pesar que los camiones difieren en tonelaje para la operación con camiones ICE, se utilizan carrocerías hechas por Randon para 10 pallets.

Los centros de operación se encuentran en Chile y los centros de distribución se ubican a 20 km de la ciudad mas importante, Santiago, Los centros de distribución cuentan con espacio suficiente para la carga/descarga de material y para el guardado correspondiente de los camiones, junto con tener una conexión eléctrica que puede soportar más de 10 MW de carga extra a la usada actualmente.

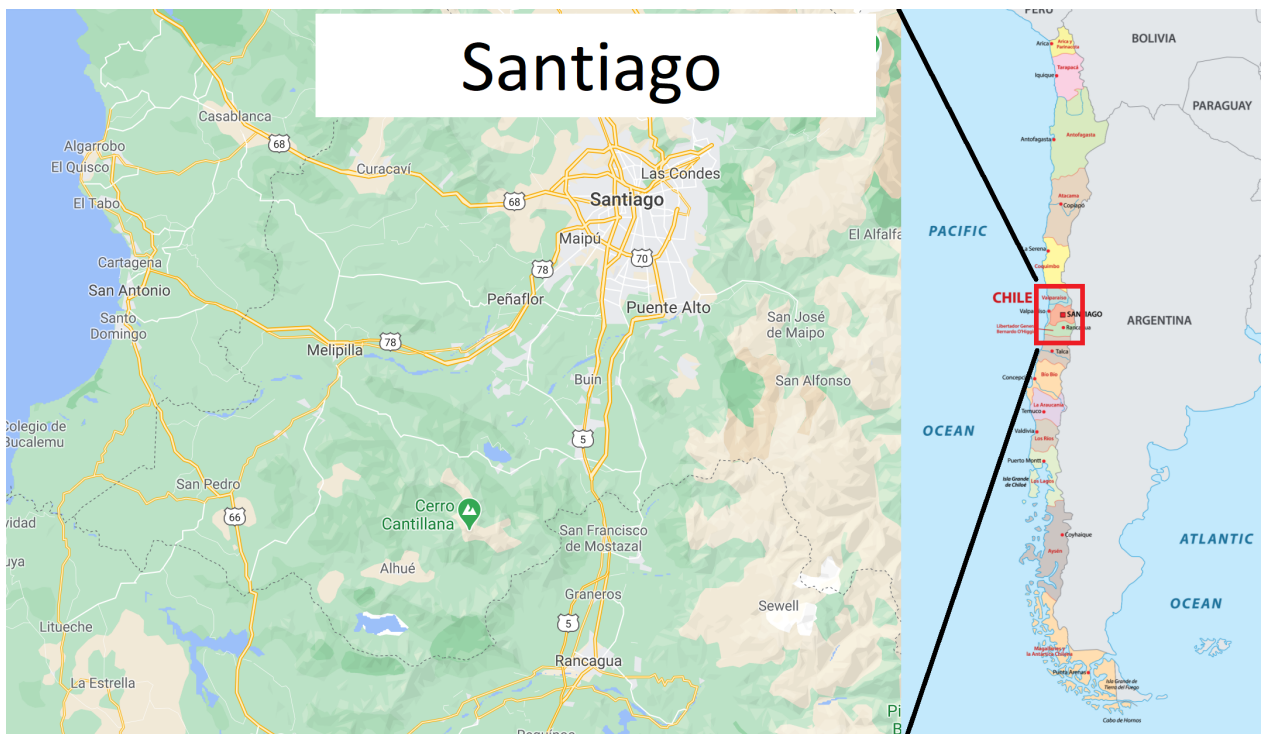


Figura 3.1: Mapa Centros de operación dimensionados para el cliente 1

El proceso de carga del producto del cliente 1 transcurre durante la noche, entre 22 y 7 horas, siendo por camión una duración entre 30 y 50 minutos (el resto del tiempo está detenido cargado, o detenido descargado). La operación se realiza entre 316 días en el año.

La distancia diaria recorrida por camión es entre 75 y 95 km para el cliente 1, nunca menor de 70 km diarios y nunca mayor a los 100 km diarios. La topología de los recorridos es considerado plano, como se observa en la figura 3.3, las pendientes en los recorridos no son importantes, sin dificultades y su recorrido total es urbano asfaltado, las rutas son conocidas e iguales exceptuando momentos de accidentes o desvíos.

El clima de Santiago es templado con lluvias invernales y una estación seca prolongada, aunque en los últimos años las precipitaciones han disminuido considerablemente debido al cambio climático, las temperaturas oscilan en máximos de -3 a 38 grados, con promedios entre 8 y 23 grados (figura 3.4)

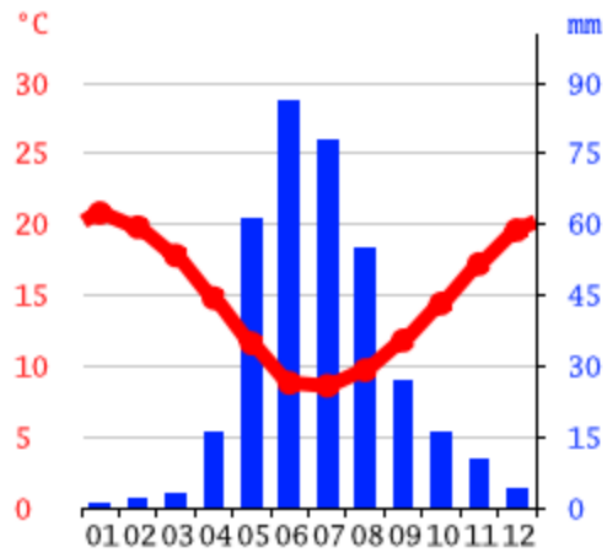


Figura 3.2: Climograma Santiago

Tabla 3.1: Camiones diesel en operación analizados para el cliente 1

Marca	Modelo	Cantidad	Carga útil [Kg]	Costo mantenimiento [CLP/km]	Rendimiento [km/lt]	[Km/año]
Mercedes Benz	Atego 1624	91	10000	72	3.0	24,504
Mercedes Benz	Atego 1726	50	11840	72	2.5	19,620
Mercedes Benz	Atego 1730	30	11490	72	3.6	27,732
Freightliner	M2 106	37	10000	79	2.4	19,596
Total camiones Cliente 1		208				

Cliente 2: El cliente tiene una operación logística con el transporte de bebidas, ubicado en México, con centros de distribución en distintos puntos de la ciudad de México. Los camiones en operación evaluados para su reemplazo consistían en camiones de 5 y 12 toneladas de carga útil, de las marcas Volkswagen, Freightliner y International. Los costos de mantención fueron entregados en pesos mexicanos (MXN) por modelo de camión ICE, junto con los rendimientos de operación también seccionados por modelo. Se entregó la cantidad de kilómetros recorridos diarios promedio, toda esta información está recopilada en la tabla 3.2. A pesar que la carga útil de los camiones ICE de Volkswagen y Freightliner difieren, se usan carrocerías para 10 pallets, que es una característica crítica operacional de los camiones.

Los centros de distribución del cliente 2 se encuentran en ciudad de México (CDMX), actualmente los centros de distribución están sobredimensionados para la operación, y análogo al cliente 1, por la naturaleza de esta, la cantidad de camiones en la flota no puede ser disminuida debido a la demanda en tiempo de carga y descarga de mercadería en los distintos

clientes finales. La conexión eléctrica industrial de los centros de distribución del cliente 2 también están sobredimensionados, por lo que no es necesario un empalme o una actualización del sistema eléctrico, siendo vital al momento de ver costos de infraestructura.

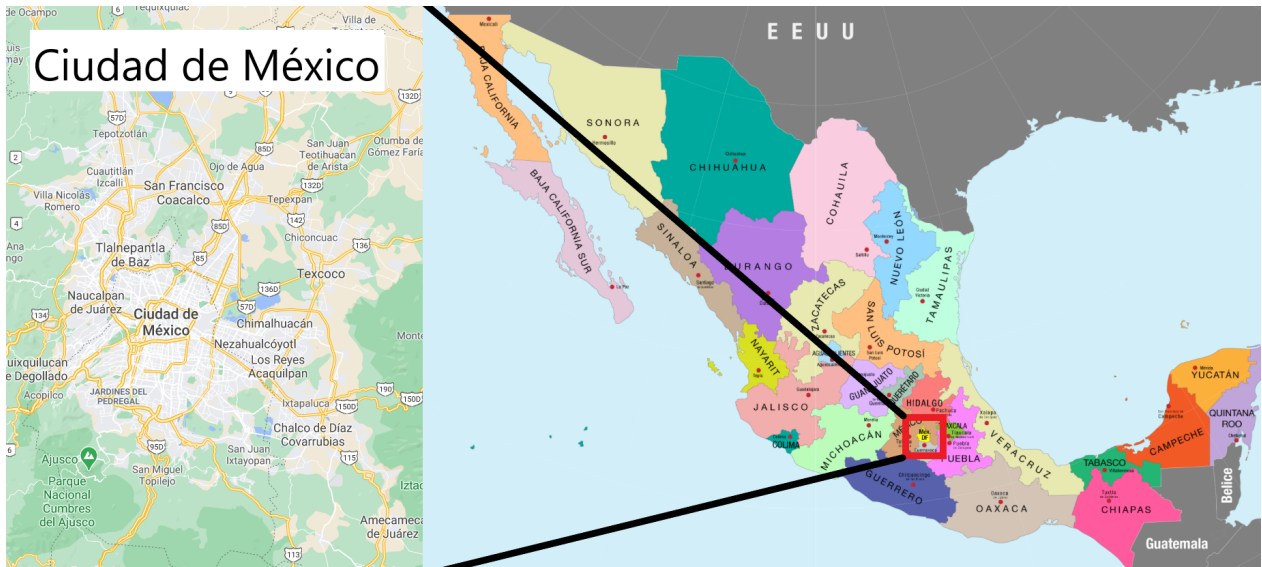


Figura 3.3: Mapa de operación dimensionados para el cliente 2

El proceso de carga de mercadería para el cliente 2 se realiza durante 8 horas en la madrugada, sin una ventana de tiempo exacta, la carga de productos por camión demora aproximadamente 30 minutos, por lo que el tiempo para la carga de la batería de los camiones es de 7.5 hrs, el resto del tiempo el camión se encuentra detenido cargado o detenido descargado. La operación se realiza 6 días a la semana.

La distancia diaria recorrida por camión del cliente 2 es de un promedio de 54 km, nunca excediendo los 65 km. Debido a la topología general de ciudad de México como se puede observar en la imagen 3.4, se considera una ruta sin pendientes importantes en su mayoría, con una pendiente máxima de 7%, sin dificultades y completamente asfaltado, con rutas conocidas e iguales exceptuando momentos de accidentes o desvíos. Existen pendientes en ciertos caminos de Ciudad de México, pero las rutas comerciales del cliente 2 no se encuentran entre ellas, por lo que se consideró una topología plana.

El clima de Ciudad de México es templado lluvioso, con precipitaciones notorias de junio a octubre, con temperaturas promedio oscilando entre 13 a 18 grados, con mínimas de 0 y máximas de 30 grados.

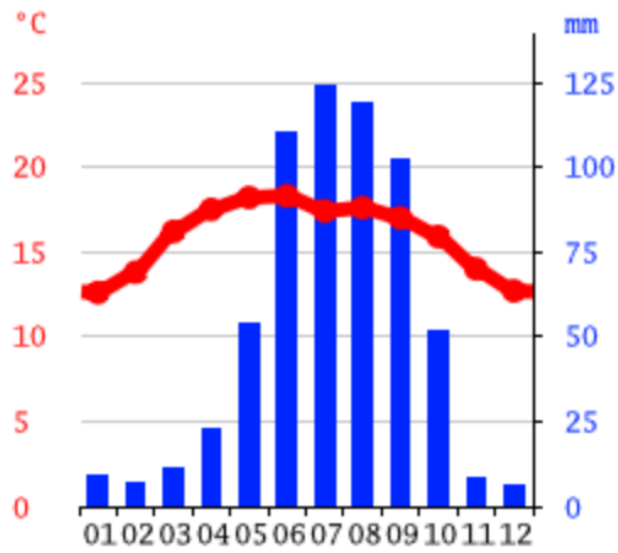


Figura 3.4: Climograma Ciudad de México

Tabla 3.2: Camiones diesel en operación analizados para el cliente 2

Marca	Modelo	Cantidad	Carga útil [kg]	Costo Mantenimiento [MXN/Km]	Rendimiento	km año
Volkswagen	Constellation	600	13180	1.96	3.5	15600
Freightliner	M2 35K	600	12000	1.96	3.6	19344
International	City star 5	256	5000	1.37	6.6	18720
Total camiones Cliente 2		1456				

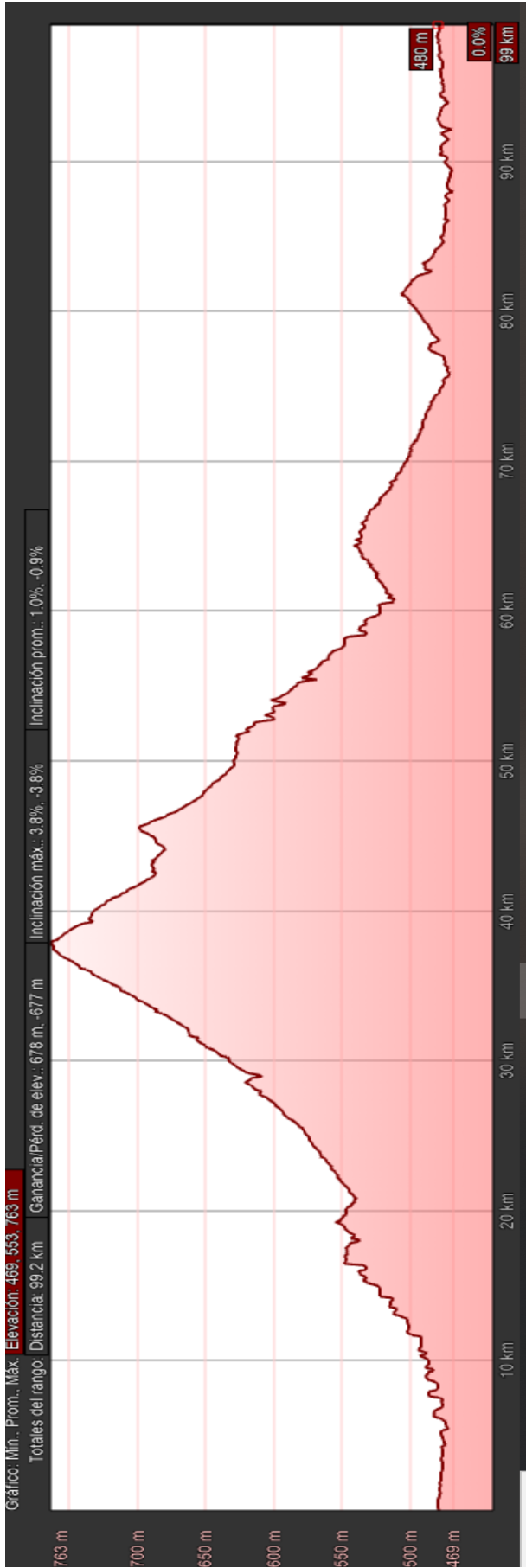


Figura 3.5: Perfil topológico de ruta para dimensionamiento cliente 1

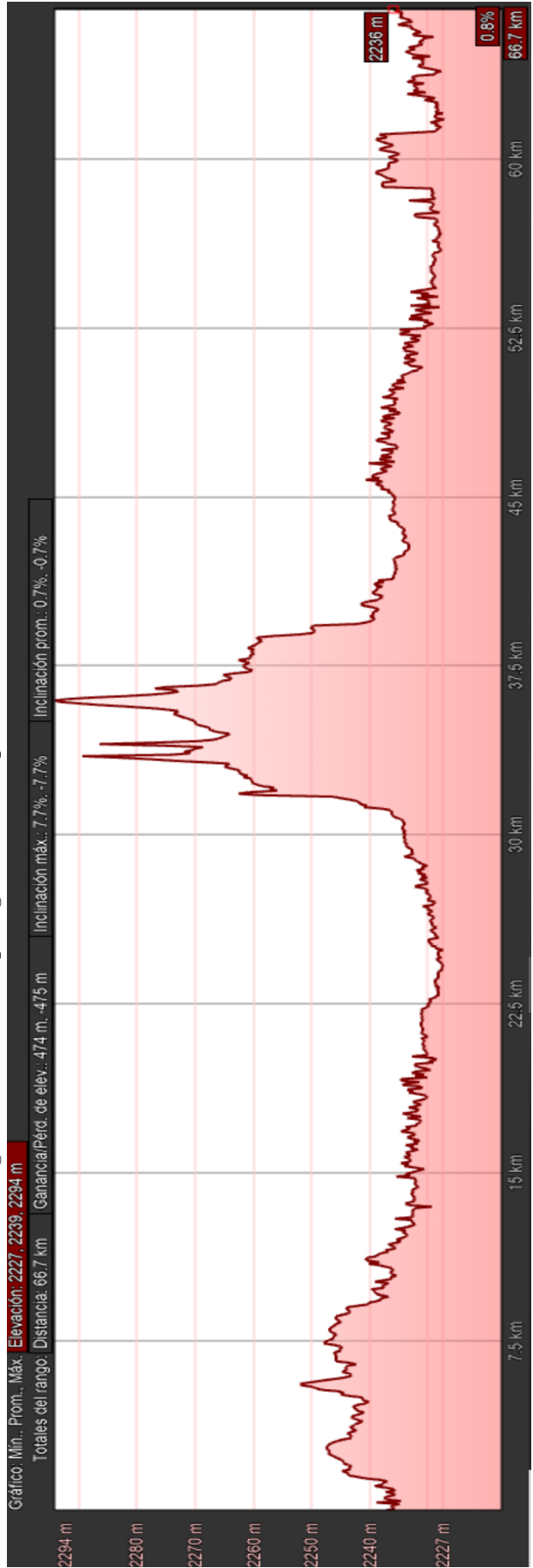


Figura 3.6: Perfil topológico de ruta para dimensionamiento cliente 2

# Capítulo 4

## Análisis técnico

En esta sección se revisará las condiciones operativas mencionadas en el capítulo anterior encontrando una lista de posibles camiones a utilizar dependiendo de la flota, revisando la cantidad de kilómetros recorridos y la capacidad de carga necesaria, dificultades en la ruta y topología de esta, capacidad de carga y/o volumen de carga requerido, formato del camión a utilizar, la infraestructura actual y sus modificaciones para realizar la carga y finalmente, tipo y tiempos de carga requerido por la operación. También se realizará el cálculo de emisiones de  $CO_2$ .

### 4.1. Vehículos disponibles

En relación al cliente 1, debido a la topología sin cambios de altitudes ni pendientes significantes en su operación, se consideró una topología plana. El tipo de camión usado actualmente ICEV son camiones de 10-12 toneladas de carga útil, por lo que se consideraron solo camiones eléctricos que cumplan esta condición. El promedio de distancia recorrida diaria por camión es de 80 km, pero debido a la naturaleza de la operación, debió ser excluyente el dimensionamiento en relación al camión de mayor recorrido, siendo este cercano a 100 km diarios. Observando la tabla 1.2 notamos que existen camiones actualmente en el mercado que cumplen ambos requerimientos, de capacidad de carga y de autonomía diaria siendo estos:

- DAF LF
- Maxus ET-1829
- Daimler eActros
- Daimler eFuso One
- Renault D Z.E.
- Emiss EMS 1820

- Emiss EMS 1824
- Volvo FL Electric
- BYD T8
- Emiss EMS 1612

Es necesario mencionar que los rendimientos de los camiones son variables dependiendo de la topología y hábitos de uso del conductor en la ruta. Por esta razón se dimensionó como el recorrido necesario un 30% superior al requerido por el cliente, por razones de seguridad y degradación de la batería producto del uso de este y su carga. Los camiones de 10 y 12 toneladas de capacidad de carga pueden ser modificados para poder transportar 10 pallets de mercadería, por lo que cumplen con esta necesidad del cliente.

Análogo al cliente 1, la operación del cliente 2 también es de topología plana, sin grandes pendientes, junto con ocupar camiones de 5 y 12-13 toneladas de carga útil, por lo que se consideraron camiones que cumplan esta condición de carga útil. El kilometraje recorrido por camión está entre el rango de 50 y 65 km, nunca mayor a 70 km, por lo que, debido a la naturaleza de la operación, el dimensionamiento posterior de cantidad de energía requerida por la operación será basada en esta última restricción. Se observó que existen camiones eléctricos en el mercado que cumplen las necesidades del cliente 2, siendo estos para los camiones de 5 y 12-13 toneladas de carga útil:

Rango 12-13 ton.:

- BYD eTBA
- Daimler eM2
- DAF LF
- Maxus ET-1829
- Daimler eActros

Rango 5 ton.:

- JMC Conquer BEV
- Emiss EMS 1220
- Emiss EMS 1008
- BYD T7

Es necesario mencionar que al momento de dimensionar la infraestructura de carga, emisiones y análisis económico, se clasificaron las flotas por tonelaje, por lo que el modelo de camión eléctrico elegido para dicho tonelaje será único.



## 4.2. Infraestructura de carga

Para el cliente 1, debido al tiempo disponible que tienen los camiones de 9 horas de manera nocturna, se descontó el tiempo de carga y manejo (1 hora por camión), disponiendo de 8 horas para cargar la batería tractora. Debido a la naturaleza de la operación, los camiones necesitan obtener una carga para al menos recorrer su ruta de mayor longitud, por lo que se debe cargar al menos la cantidad de energía necesaria para realizar 100 km (ruta de mayor longitud), pudiendo calcular esa energía en relación a su rendimiento junto con los tiempos de carga estimados.

Debido a la naturaleza no homogénea química y/o de producción de las baterías en distintos proveedores, se realizó una estimación de los tiempos de carga estimados con las siguientes ecuaciones:

$$R_{ce}[kWh/km] = T_{be}[kWh] \cdot A_e[km] \quad (4.1)$$

$$E_c[kWh] = R_{ce}[kWh/km] \cdot K_c[km] \quad (4.2)$$

$$T_c[hrs] = E_c[kWh] \cdot P_c[kW] \quad (4.3)$$

Donde:

- $R_{ce}$  = Rendimiento del camión en kWh/km.
- $C_{be}$  = Capacidad de la batería en kWh.
- $A_e$  = Autonomía según el fabricante del camión eléctrico en km.
- $E_c$  = Energía requerida para recorrer  $k_c$  según camión.
- $k_c$  = La cantidad de kilómetros diarios requeridos por cada cliente.
- $T_c$  = Tiempo de carga necesario para obtener la energía requerida en horas.
- $P_{ce}$  = Potencia de carga o tasa de aceptación del camión en kW.

Utilizando las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 se calculó las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 de energías necesarias y tiempos de carga para la operación del cliente 1 y 2 respectivamente:

Tabla 4.1: Energía requerida, potencia de carga y tiempo de carga por camión para cliente 1

Camión	Rendimiento [kWh/km]	Energía requerida [kWh]	Carga camión [kW]	Tiempo de carga [hrs]
DAF LF	1.01	131	150	0.9
Maxus ET-1829	1.10	142	22	6.5
Daimler eActros	1.20	156	150	1.0
Daimler eFuso One	0.94	122	150	0.8
Renault D Z.E.	1.00	130	150	0.9
Emoss EMS 1820	1.05	137	40	3.4
Emoss EMS 1824	1.04	136	40	3.4
Volvo FL Electric	1.00	130	150	0.9
BYD T8	1.09	141	150	0.9
Emoss EMS 1612	0.96	125	40	3.1

Tabla 4.2: Energía requerida, potencia de carga y tiempo de carga por camión para cliente 2, camiones de 12-13 ton

Camión	Rendimiento [kWh/km]	Energía requerida [kWh]	Carga camión [kW]	Tiempo de carga [hrs]
BYD T9	1.17	106	100	1.1
Freightliner eM2	0.88	80	150	0.5
DAF LF	1.01	92	150	0.6
Maxus ET-1829	1.10	100	60	1.7
Daimler eActros	1.20	109	150	0.7

Tabla 4.3: Energía requerida, potencia de carga y tiempo de carga por camión para cliente 2, camiones de 5 ton

Camión	Rendimiento [kWh/km]	Energía requerida [kWh]	Carga camión [kW]	Tiempo de carga [hrs]
JMC Conquer BEV	0.43	39	40	1.0
Emoss EMS 1220	0.80	73	40	1.8
Emoss 1008	0.80	73	40	1.8
BTD T7	0.88	80	100	0.8

Notese que los valores obtenidos son según las fichas técnicas de cada camión, por lo que la energía requerida, carga o tasa de aceptación y tiempos de carga pueden variar según operación y hábitos de conducción.

Debido que los camiones tienen cerca de 8 horas de carga por noche para el cliente 1, los tiempos de carga observados en la tabla 4.1 son suficientes para completar el viaje de mayor distancia recorrida por día, siendo factible una carga nocturna en los centros de distribución de la empresa sin necesidad de una carga en ciudad. Es más, debido a que algunos camiones tienen una autonomía superior a 200 km (ver tabla 1.2), es posible que en ciertos modelos

puedan tener dos días de operación sin ningún tipo de carga alguna, siendo un factor relevante al momento de dimensionar cuantos cargadores son necesarios para la operación.

La operación de los clientes 1 y 2 son demandantes en tiempo en la operación por la recurrente carga y descarga de materiales en los lugares de despacho en horarios ya determinados, por lo que a pesar que el camión eléctrico tenga una autonomía mayor, es inviable un recorrido diario mayor, ya que actualmente se tienen tiempos acotados de descarga, por lo que el tamaño de flota de los camiones eléctricos no variará a la actual con los camiones diesel.

Para efectos del dimensionamiento de cargadores para los clientes 1 y 2, se consideró un tiempo de carga de mayor duración que el calculado para efectos de problemas operativos, problemas de carga u otros acontecimientos que puedan ocurrir. Este tiempo de carga considerado fue un 20% superior al calculado en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3. También se consideró que los camiones serán cargados todas las noches con la cantidad necesaria para la operación de un día, dando como resultado las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 para el dimensionamiento de cargadores y las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 para el estado de carga estimado diario. En este último se consideró una carga lenta para el cliente 1, y cargas rápidas para el cliente 2 en ambas flotas, junto con agregar una hora detenido por horario de almuerzo/colación y una carga/descarga lineal en el día.

Tabla 4.4: Dimensionamiento de cargadores para cliente 1.

Camión	Tiempo de carga calculado [hrs]	Tiempo de carga considerado [hrs]	Camiones por cargador	Cargadores	Potencia Cargadores [kW]
DAF LF	0.9	1.0	7	30	150
Maxus ET-1829	6.5	7.8	1	208	22
Daimler eActros	1.0	1.2	6	35	150
Daimler eFuso One	0.8	1.0	8	26	150
Renault D Z.E.	0.9	1.0	7	30	150
E Moss EMS 1820	3.4	4.1	1	208	40
E Moss EMS 1824	3.4	4.1	1	208	40
Volvo FL Electric	0.9	1.0	7	30	150
BYD T8	0.9	1.1	7	30	150
E Moss EMS 1612	3.1	3.7	2	104	40

Tabla 4.5: Dimensionamiento de cargadores para cliente 2, camiones de 12-13 ton.

Camión	Tiempo de carga calculado [hrs]	Tiempo de carga considerado [hrs]	Camiones por cargador	Cargadores	Potencia Cargadores [kW]
BYD T9	1.1	1.3	6	200	100
Freightliner eM2	0.5	0.6	12	100	150
DAF LF	0.6	0.7	10	120	150
Maxus ET-1829	1.7	2.0	4	300	60
Daimler eActros	0.7	0.9	9	134	150

Tabla 4.6: Dimensionamiento de cargadores para cliente 2, camiones de 5 ton.

Camión	Tiempo de carga calculado [hrs]	Tiempo de carga considerado [hrs]	Camiones por cargador	Cargadores	Potencia Cargadores [kW]
JMC Conquer BEV	1.0	1.2	6	43	40
E Moss EMS 1220	1.8	2.2	3	86	40
E Moss 1008	1.8	2.2	3	86	40
BTD T7	1.0	1.2	8	32	100

Tabla 4.7: Carga eléctrica máxima a la red del cliente 1 producto de la carga de camiones de 12 ton.

Camión	Carga eléctrica máxima [MW]
DAF LF	4.50
Maxus ET-1829	4.58
Daimler eActros	5.25
Daimler eFuso One	3.90
Renault D Z.E.	4.50
E Moss EMS 1820	8.32
E Moss EMS 1824	8.32
Volvo FL Electric	4.50
BYD T8	4.50
E Moss EMS 1612	4.16

Tabla 4.8: Carga eléctrica máxima a la red del cliente 2 producto de la carga de camiones de 12-13 ton.

Camión	Carga eléctrica máxima [MW]
BYD T9	20.00
Freightliner eM2	15.00
DAF LF	18.00
Maxus ET-1829	18.00
Daimler eActros	20.10

Tabla 4.9: Carga eléctrica máxima a la red del cliente 2 producto de la carga de camiones de 5 ton.

Camión	Carga eléctrica máxima [MW]
JMC Conquer BEV	1.72
E Moss EMS 1220	3.44
E Moss 1008	3.44
BTD T7	3.2

Perfil del estado de carga estimado diario Cliente 1



Figura 4.1: Perfil de carga diario estimado para el cliente 1.

Perfil del estado de carga estimado diario Cliente 2, 12 ton

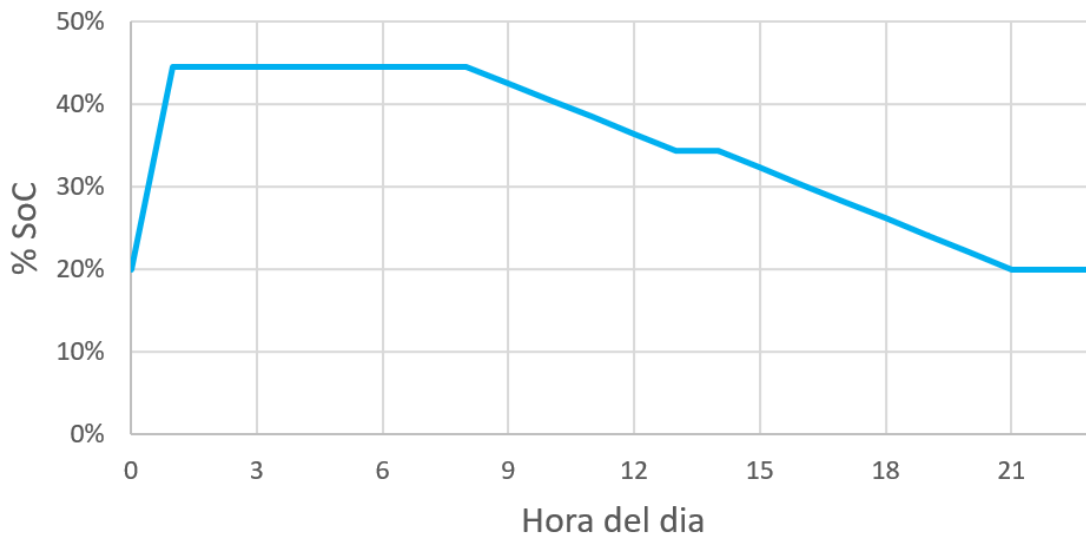


Figura 4.2: Perfil de carga diario estimado para el cliente 2, camión de 12 ton.

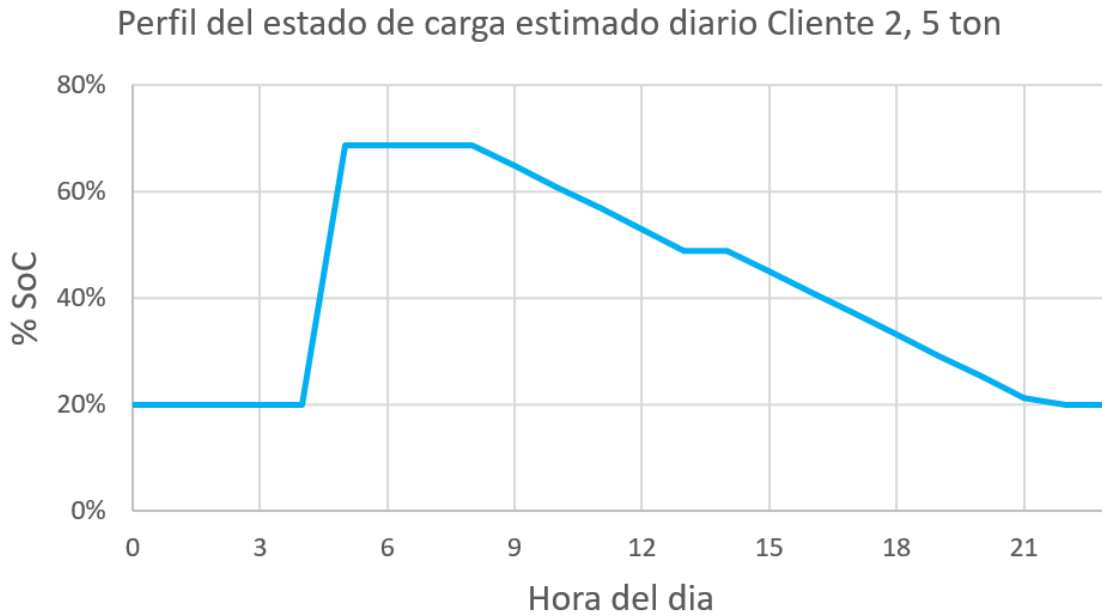


Figura 4.3: Perfil de carga diario estimado para el cliente 2, camión de 5 ton.

Se asume que los centros de distribución de los clientes 1 y 2 tienen espacio suficiente para la operación actual, por lo que la implementación física de los camiones eléctricos no tiene percances, junto con poseer una red eléctrica apta para poder soportar la carga eléctrica continua extra para efectos de carga máxima eléctrica a los camiones respectivamente, que es superior al máximo de carga eléctrica posible instantánea producido por los cargadores eléctricos (100 % utilización con el 100 % de potencia eléctrica) por lo que la instalación y futuro mantenimiento de los cargadores es completamente factible.

### 4.3. Cálculo de emisiones

En esta sección se realizaron los cálculos de emisiones de  $CO_2$  para camiones eléctricos y camiones diesel, sin contar las emisiones por fabricación de dichos vehículos, contando únicamente operación de estos vehículos.

El cálculo de emisiones de operación se calculó por parte de camiones eléctricos, contando las emisiones generadas por la generación energética para su operación, osea, la generación en la matriz energética de cada país, y las emisiones de los camiones diesel generado por la operación.

Para conocer las emisiones liberadas por la operación tanto por camiones ICE o EV, es necesario conocer la energía o combustible requerido para su uso. El cálculo de los litros de combustible y energía cargada seguirá las ecuaciones 4.4 y 4.5.

$$\text{Diesel anual [lt]} = \frac{\text{Distancia recorrida anual [km]}}{R_{cd}[km/lt]} \quad (4.4)$$

$$\text{Energía anual [kWh]} = \frac{\text{Distancia recorrida anual [km]}}{R_{ce}[\text{kWh}/\text{km}]} \quad (4.5)$$

Siendo:  $R_{cd}$  = Rendimiento del camión diesel.  $R_{ce}$  = Rendimiento del camión eléctrico.

Ocupando las tablas 3.1 y 3.2 y la ecuación 4.4, se calculó la cantidad de litros necesarios para la operación del cliente 1 y 2 para camiones diesel actuales, mostrados en las tablas 4.10 y 4.11:

Tabla 4.10: Litros necesarios para la operación, cliente 1

Marca	Modelo	Lt. necesarios
hline Mercedes Benz	Atego 1624	743.288
Mercedes Benz	Atego 1726	392.400
Mercedes Benz	Atego 1730	231.100
Freightliner	M2 106	302.105
Total litros		1.668.893

Tabla 4.11: Litros necesarios para la operación, cliente 2

Marca	Modelo	lt gastados
Volkswagen	Constellation	2,674,286
Freightliner	M2	3,224,000
International	City star 5	726,109
Total litros		6.624.395

Notese que la tabla 4.10 contiene toda la operación del cliente 1, osea, los 208 camiones, separados por modelo.

Análogo al dimensionamiento de litros necesarios para la operación, se realizó el cálculo de energía requerida por la flota de camiones eléctricos para la operación de manera anual. Se usó un promedio ponderado de kilometraje de operación para ambos clientes. Se asumió un recambio total de la flota por una marca y modelo específico, por lo que la energía anual corresponde al total de 208 camiones de la flota del cliente 1 y 1456 camiones para el cliente 2, contando ambas flotas por separado. Usando las tablas 3.1 y 4.1 para el cliente 1 y las tablas 3.2, 4.2 y 4.3 para el cliente 2, junto con la ecuación 4.5 se calculó la energía requerida anual para el cliente 1 y 2, mostrados en las tablas 4.12, 4.13 y 4.14

Tabla 4.12: Energía requerida anual por el cliente 1 según camión eléctrico

Camión	Rendimiento [kWh/km]	Km anual	Energía anual [MWh]
DAF LF	1.01	22,922	4,811
Maxus ET-1829	1.10	22,922	5,221
Daimler eActros	1.20	22,922	5,721
Daimler eFuso One	0.94	22,922	4,470
Renault D Z.E.	1.00	22,922	4,768
Emiss EMS 1820	1.05	22,922	5,019
Emiss EMS 1824	1.04	22,922	4,975
Volvo FL Electric	1.00	22,922	4,768
BYD T8	1.09	22,922	5,173
Emiss EMS 1612	0.96	22,922	4,577

Tabla 4.13: Energía requerida anual por el cliente 2 según camión eléctrico de 12-13 ton

Camión	Rendimiento [kWh/km]	Km anual	Energía anual [MWh]
BYD T9	1.17	17,691	25,924
DAF LF	1.01	17,691	22,422
Maxus ET-1829	1.10	17,691	24,331
Daimler eActros	1.20	17,691	26,665

Tabla 4.14: Energía requerida anual por el cliente 2 según camión eléctrico de 5 ton

Camión	Rendimiento [kWh/km]	Km anual	Energía anual [MWh]
JMC Conquer BEV	1.05	17,691	4,767
Emiss EMS 1220	1.04	17,691	4,726
Emiss 1008	1.00	17,691	4,529
BTD T7	1.09	17,691	4,914

Las emisiones tienen directa relación con el combustible usado para su operación, siendo para los camiones ICE el combustible usado para su transporte y movimiento, y para los camiones EV la energía necesaria para su carga. Tanto la combustión diesel como la energía eléctrica por la matriz de cada país tiene un factor de contaminación por litro y kWh consumida respectivamente. El factor para la combustión diesel se encuentra en 1.5.1, y los factores de contaminación por matriz energética de Chile y México se encuentran en 1.4.1 y 1.4.3 respectivamente, siendo mostrados en la tabla 4.15

Tabla 4.15: Factor de contaminación diesel, matriz chilena y matriz mexicana

	Diesel	Matriz Chilena	Matriz Mexicana
Factor	2.64	0.4056	0.505
Unidad	$\frac{kgCO_2e}{lt}$	$\frac{kgCO_2e}{kWh}$	$\frac{kgCO_2e}{kWh}$



Siendo  $kgCO_2e$  = a kilogramo de  $CO_2$  equivalente.

Ocupando las ecuaciones 4.4, 4.5 y los factores de la tabla 4.15 se calculó las emisiones de  $CO_2$  de la operación ICE, 4.16, 4.17 respectivamente, junto con las emisiones de la operación EV dimensionada y su reducción con respecto a la operación ICE, mostrados en las tablas 4.18, 4.19 y 4.20:

Tabla 4.16: Emisiones de  $CO_2$  de la operación ICE, cliente 1

Camión	Emisiones $tCO_2$
Mercedes Benz Atego 1624	1,962
Mercedes Benz Atego 1726	1,036
Mercedes Benz Atego 1730	610
Freightliner M2 106	798
Total Emisiones ICE	4,406

Tabla 4.17: Emisiones de  $CO_2$  de la operación ICE, cliente 2

Camión	Emisiones $tCO_2$
Volkswagen Constellation	7.060
Freightliner M2	8.511
International City star 5	1.917
Total Emisiones ICE	17.488

Tabla 4.18: Emisiones de  $CO_2$  de la operación EV, cliente 1

Camión	Emisiones $tCO_2$	Reducción [%]
DAF LF	1,951	56
Maxus ET-1829	2,118	52
Daimler eActros	2,321	47
Daimler eFuso One	1,813	59
Renault D Z.E.	1,934	56
Emoss EMS 1820	2,036	54
Emoss EMS 1824	2,018	54
Volvo FL Electric	1,934	56
BYD T8	2,098	52
Emoss EMS 1612	1,856	58

Tabla 4.19: Emisiones de  $CO_2$  de la operación EV, cliente 2, camiones de 12-13 ton.

Camión	Emisiones $tCO_2$	Reducción [%]
BYD T9	11.802	24
Freightliner eM2	8.886	43
DAF LF	10.208	34
Maxus ET-1829	11.077	29
Daimler eActros	12.139	22

Tabla 4.20: Emisiones de  $CO_2$  de la operación EV, cliente 2, camiones de 5 ton.

Camión	Emisiones $tCO_2$	Reducción [%]
JMC Conquer BEV	1.044	46
Emoss EMS 1220	1.936	-1
Emoss 1008	1.936	-1
BTD T7	2.118	-10

Es necesario notar que la flota de camiones de 12-13 toneladas para el cliente 2 es la suma entre los camiones Volkswagen Constellation y Freightliner M2, junto con la flota de 5 ton para el cliente 2 es la suma de los camiones Internationa City star 5.

Las emisiones locales de los EV son cero, debido que no emiten gases de escape de combustión, en cambio, para los ICE son los de la tabla 4.16. Para la componente global, el valor de emisión es cero, ya que no se considera una emisión asociada a la carga de diesel (fuera de la producción propia del lugar de recarga y extracción y refinación del petróleo, que no se considerará tampoco), en cambio el eléctrico si tiene una componente global debido a su carga eléctrica debida a la matriz eléctrica de cada país.

# Capítulo 5

## Análisis económico

En esta sección se revisará la factibilidad económica en relación a la factibilidad técnica, revisando oferta de camiones disponibles que cumplan la necesidad operativa y existan actualmente en el mercado del país correspondiente.

Es necesario mencionar que en esta sección se evaluó solo un camión eléctrico de los mencionados en las listas de vehículos disponibles para cada flota de los clientes 1 y 2 respectivamente mencionados en la sección 4.1, y debido a las cláusulas de confidencialidad existentes entre Engie y el alumno el cual realizó esta tesis, no se mencionó el modelo o marca ocupado para la flota eléctrica, pero si se entregarán los valores necesarios para realizar el análisis económico general.

Se dimensionó un camión eléctrico entre 10 y 12 toneladas de carga útil para el cliente 1, análogo a lo anterior, se realizó para el cliente 2 con un camión de 12-13 toneladas y uno de 5 que cubran la flota correspondiente a dicha carga útil requerida, es decir, 208 camiones de 10-12 toneladas para el cliente 1, 1200 camiones de 12-13 toneladas y 256 camiones de 5 toneladas para el cliente 2. Es necesario mencionar que estos camiones están disponibles para su venta actual en cada uno de los países.

Debido a la utilización de estos camiones, es necesario que estos camiones tengan un representante de marca en cada país que pueda proveer de repuestos necesarios de manera segura, por lo que se realizó un filtro en marcas y modelos previos para la factibilidad económica, observando la estabilidad del representante y mercado de repuestos eléctricos para cada uno de los camiones, llevado a cabo por cada uno de los equipos de Engie en cada país.

Para este análisis económico es necesario calcular el costo total de propiedad (TCO) mostrado con mayor detalle en la formula 1.2, donde se debió determinar distintos parámetros de entrada asociados a variables de CAPEX, OPEX y económicos de cada cliente recopilado en reuniones iniciales de información para el cliente 1 y 2, mostrados en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Detalle parametros TCO de clientes

Detalle	Unidad	Indicador	Cliente 1	Cliente 2 - 12 ton	Cliente 2 - 5 ton
Costo vehículo actual	[USD]	CAPEX	77945	64535	42695
Cantidad de vehículos en la flota	[n]	CAPEX	212	1200	256
Costo del vehículo eléctrico	[USD]	CAPEX	120000	118000	59100
Costo del cargador	[USD]	CAPEX	3000	36800	12000
Tasa Lease de compra vehículo diesel	[%]	Económico	2 %	3 %	3 %
Horizonte de evaluación flota	[Años]	Económico	5	10	10
Tasa de descuento del cliente	[%]	Económico	10 %	10 %	10 %
Rendimiento vehículo diesel	[km/lt]	OPEX	2.9	3.5	6.6
Costo de mantenimiento vehículo diesel	[USD/km]	OPEX	0.095	0.089	0.065
Distancia recorrida por vehículo diesel	[km/año]	OPEX	28080	16693	18720
Eficiencia cargador + transformador	[%]	OPEX	0.95	0.95	0.95
Costo mantenimiento de infraestructura	[USD/yr]	OPEX	200	4250	2000
Costos de distribución y facturación	[USD]	OPEX	-	-	-
Precio energía	[USD/MWh]	OPEX	65	61	61
Valor diesel	[USD]	OPEX	0.65	0.96	0.96
CPI	[%]	OPEX	3 %	3 %	3 %
Tasa lease eléctrico	[%]	OPEX	10 %	10 %	10 %
Rendimiento vehículo eléctrico	[kWh/km]	OPEX	1.10	0.88	1.05
Costo mantención eléctrico	[USD/km]	OPEX	0.017	0.02	0.015

Es necesario notar que el costo de infraestructura (base para el cargador y otros) es parte del costo de los cargadores, junto con que el espacio e infraestructura eléctrica en los centros de distribución de ambos clientes tienen la capacidad necesaria para adquirir los camiones eléctricos, por lo que no es necesario hacer una variación en el sistema eléctrico u cambios de terreno.

Los costos de distribución y facturación no se agregaron a la tabla ya que depende de cada país y tiene distintas variables explicadas en 1.4.2 para Chile y 1.4.4 para México, en ambos casos Engie provee de PPA (*Power Purchase Agreement* o Acuerdo de Compra de Energía, en español), el cual entrega un valor fijo por energía consumida/entregada al cliente,

incorporando los costos de distribución y facturación, en el caso que el cliente no tenga PPA con Engie, estos valores son mayores a cero.

Con los valores de las variables para el TCO determinados, se pudo realizar el flujo de caja a través del horizonte de evaluación de la flota de cada cliente, calculando así el VAN de la inversión, contando sus gastos en CAPEX y OPEX, teniendo en consideración las variables económicas para ambos clientes, mostrando los resultados del cálculo del TCO en las tablas 5.2, 5.3 y 5.4

Tabla 5.2: Resultados TCO Cliente 1

<b>TCO cliente 1</b>	KUSD	
	Eléctrico	Diésel
Lease tariff	27,141	14,026
Costo energía	1,711	5,334
Costo distribución	660	-
Mantenimiento camión	402	2,259
Mantenimiento infraestructura	72	-
<b>Total</b>	<b>29,985</b>	<b>21,618</b>
Diferencia	<b>-38.70 %</b>	

Tabla 5.3: Resultados TCO Cliente 2, flota 1, camiones de 12 ton

<b>TCO cliente 2 - 12 ton</b>	KUSD	
	Eléctrico	Diésel
Lease tariff	137,552	64,125
Costo energía	5,196	30,559
Costo distribución	1,769	-
Mantenimiento camión	2,272	9,923
Mantenimiento infraestructura	2,705	-
<b>Total</b>	<b>149,496</b>	<b>104,606</b>
Diferencia	<b>-42.91 %</b>	

Tabla 5.4: Resultados TCO Cliente 2, flota 2, camiones de 5 ton

<b>TCO cliente 2 - 5 ton</b>	KUSD	
	Eléctrico	Diésel
Lease tariff	14,808	9,050
Costo energía	1,483	3,877
Costo distribución	539	-
Mantenimiento camión	397	1,740
Mantenimiento infraestructura	547	-
<b>Total</b>	<b>17,776</b>	<b>14,667</b>
Diferencia	<b>-21,20 %</b>	

## 5.1. Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad se basa en cambiar variables en el cálculo del VAN (TCO en el caso de la presente tesis) observando su impacto económico, para finalmente tomar decisiones de inversión y proyectar un impacto a futuro en caso que los valores reales cambiasen al calculado en la fase de estudios de factibilidad del proyecto.

Las variables analizadas para la sensibilidad analizadas en la presente tesis fueron dos; 1) CAPEX de inversión del camión (costo neto del camión eléctrico) y 2) distancia recorrida en el año. Estas variables fueron elegidas debido al gran impacto en el valor de inversión y su alta variabilidad en condiciones reales de operación.

Se calculó tanto el CAPEX como la distancia recorrida necesaria para que la opción eléctrica tenga el mismo costo de propiedad que la opción diesel, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 5.5:

Tabla 5.5: Resultados de sensibilidad de CAPEX y distancia recorrida para cliente 1 y 2

Cliente \ Variable	CAPEX camión [USD]	Reducción CAPEX camión [%]	Distancia recorrida [km]	Aumento distancia recorrida [%]
Cliente 1	81.070	32 %	73.112	160 %
Cliente 2, 12 ton	79.081	33 %	39.669	138 %
Cliente 2, 5 ton	46.268	22 %	36.378	94 %

Estos resultados muestran la reducción de CAPEX y aumento de distancia recorrida necesarias para que el TCO de la opción eléctrica sea igual al valor calculado de TCO para las opciones actuales diesel.

## 5.2. Proyección del TCO

Junto con el cálculo del TCO, se realizó una sensibilidad con respecto al valor esperado del camión a través de un horizonte de tiempo de 5 años, con reducciones del CAPEX del camión optimistas del 15 % anual y pesimistas del 10 % anual, por lo que el valor del camión disminuye a través del tiempo. La disminución del valor se asume continua.

Teniendo en consideración escenarios optimistas y pesimistas, se iteró en los siguientes 5 años, obteniendo resultados de TCO para la opción eléctrica, las cuales son comparadas con la opción diesel. En las figuras 5.1, 5.3 y 5.5 se muestran los valores netos del escenario diesel y eléctricos pesimista y optimista, junto con su diferencia porcentual, mostrado en las figuras 5.2, 5.4 y 5.6.

### Proyección TCO con disminución anual CAPEX Cliente 1

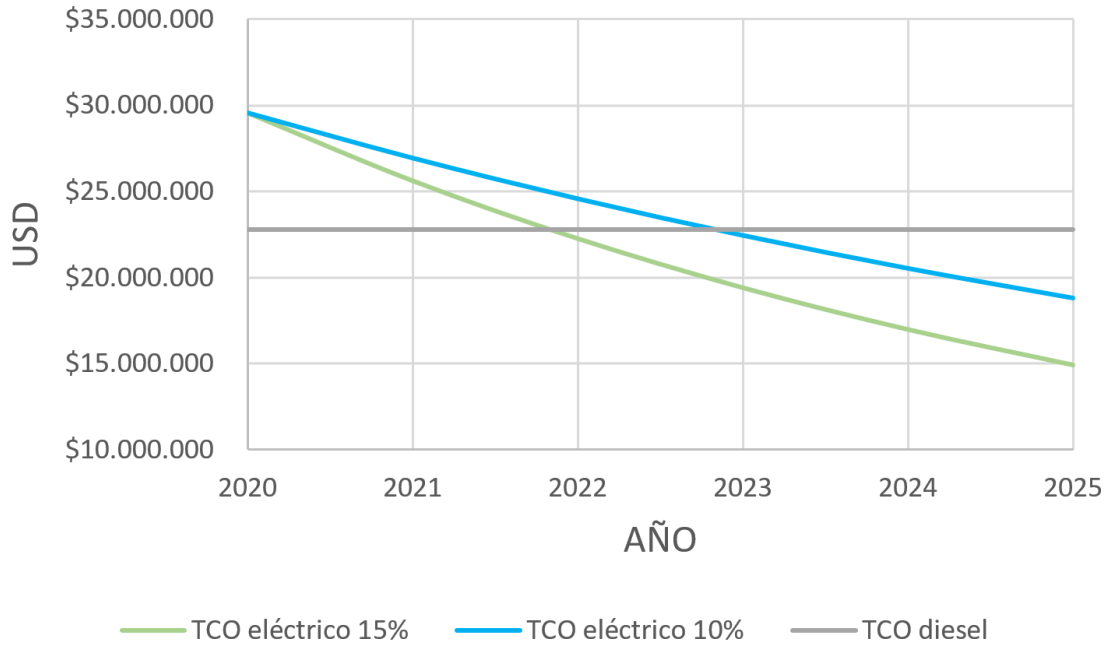


Figura 5.1: Proyección del TCO, cliente 1

### Proyección diferencia TCO entre EV y Diesel Cliente 1.

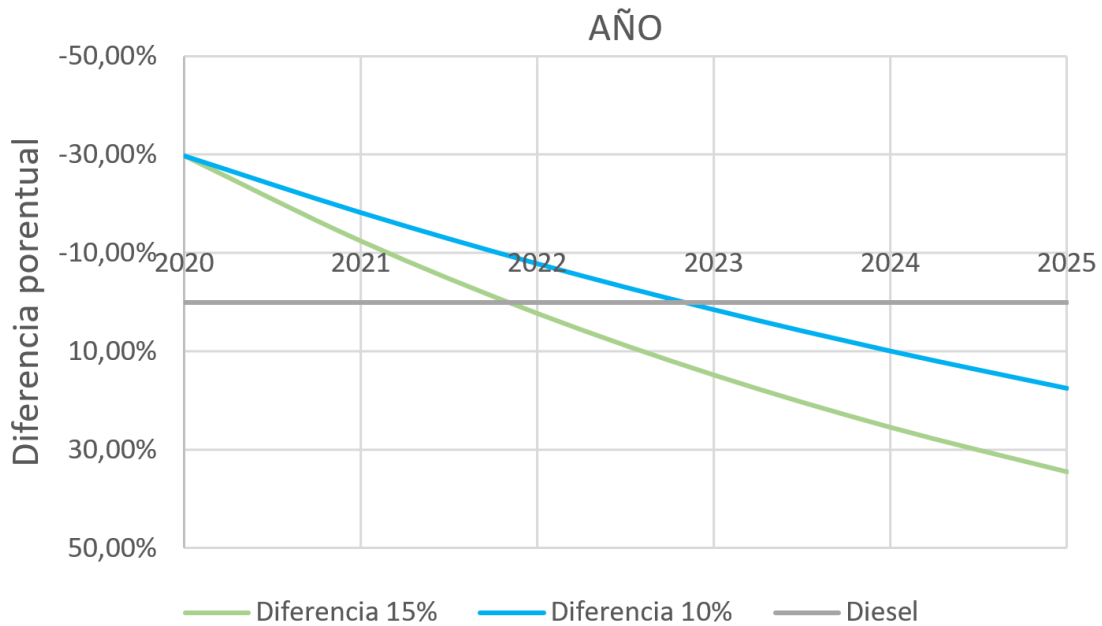


Figura 5.2: Diferencia porcentual del TCO, cliente 1

### Proyección TCO con disminución anual CAPEX Cliente 2, camiones de 12 ton.

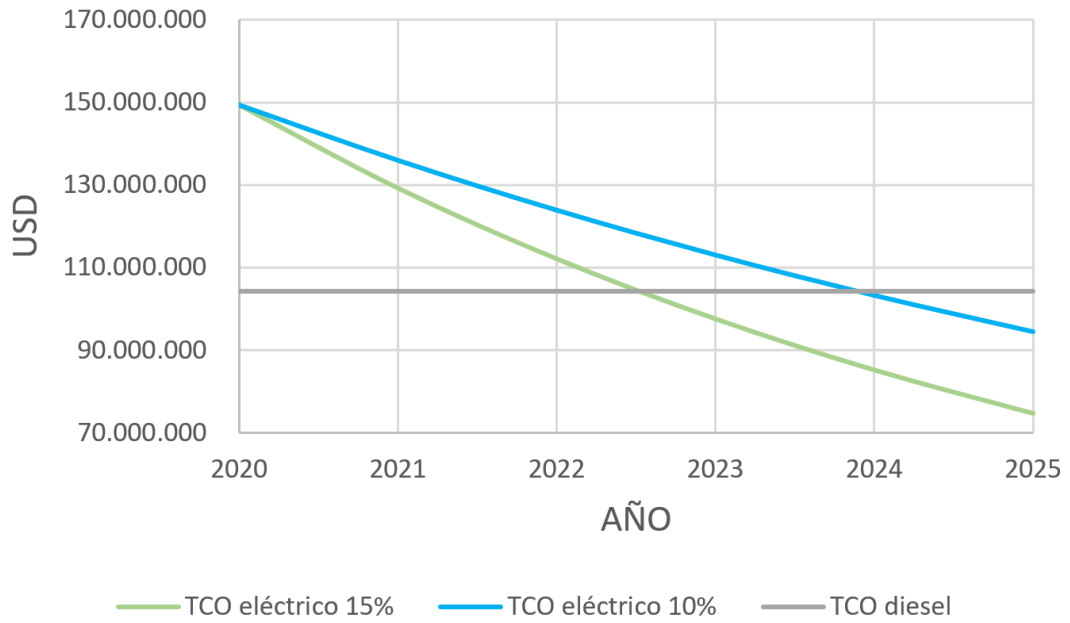


Figura 5.3: Proyección del TCO, cliente 2, camión de 12 ton

### Proyección diferencia TCO entre EV y Diesel Cliente 2, camiones de 12 ton.

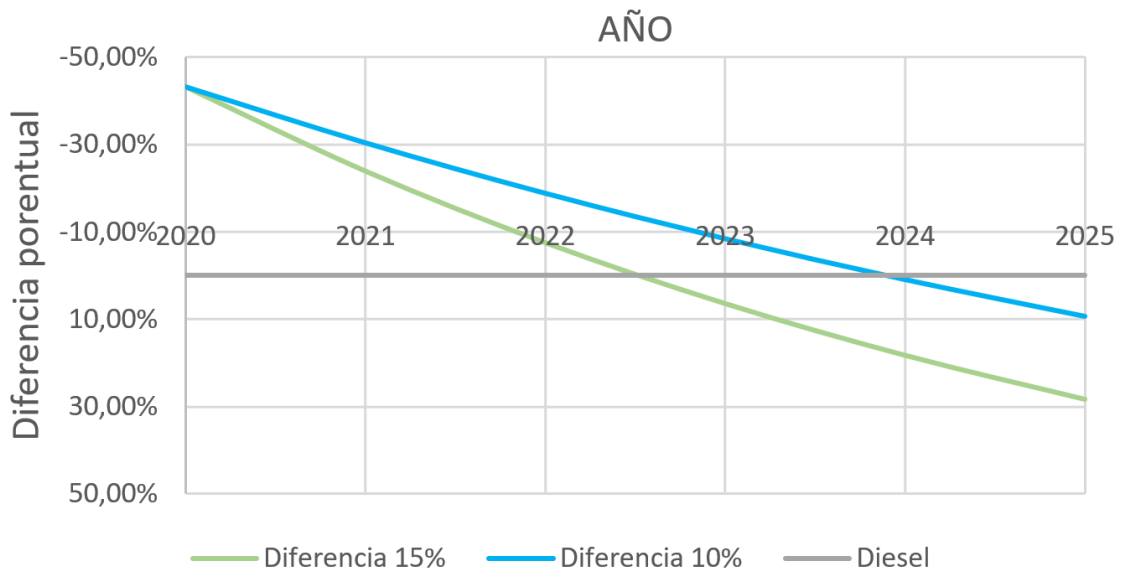


Figura 5.4: Diferencia porcentual del TCO, cliente 2, camión de 12 ton



### Proyección TCO con disminución anual CAPEX Cliente 2, camiones de 5 ton.

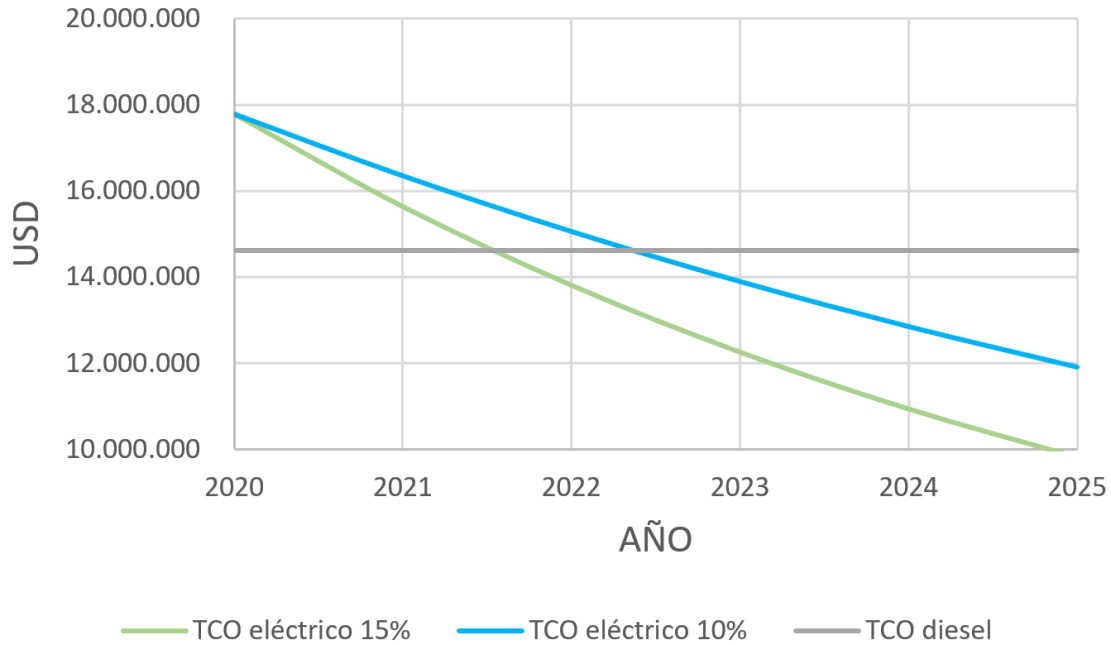


Figura 5.5: Proyección del TCO, cliente 2, camión de 5 ton

### Proyección diferencia TCO entre EV y Diesel Cliente 2, camiones de 5 ton.

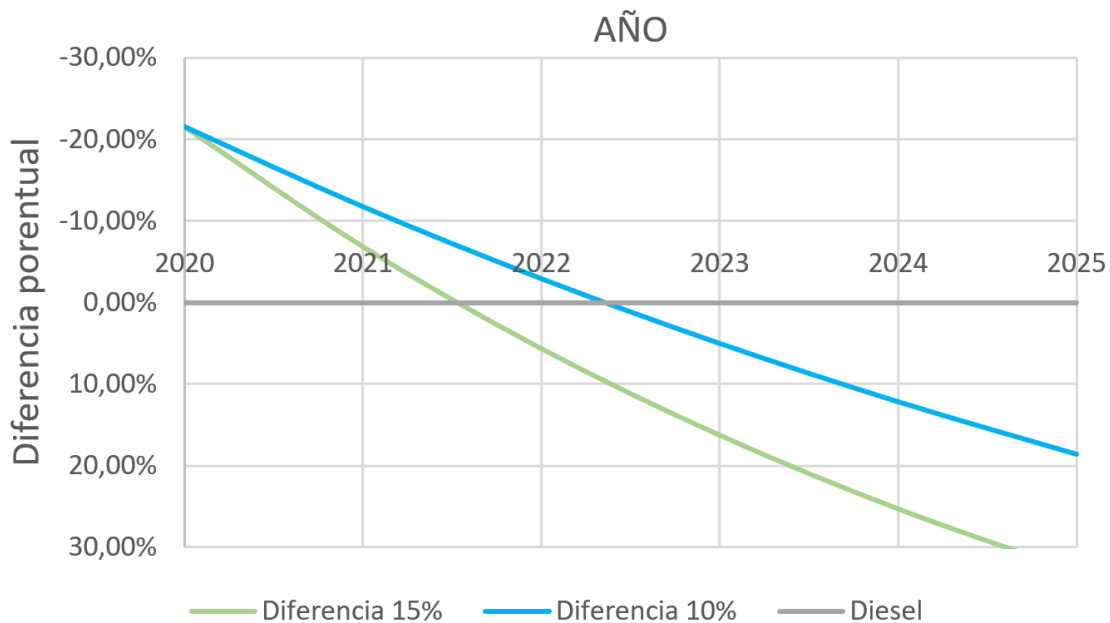


Figura 5.6: Diferencia porcentual del TCO, cliente 2, camión de 5 ton

# Capítulo 6

## Resultados finales y discusión

### 6.1. Resultados del análisis técnico

Existen mas de 25 camiones eléctricos entre 1 y 12 toneladas que cumplen los requisitos operacionales de la logística de última milla, que suele caracterizarse por tener un bajo kilometraje diario, muchas descargas en los clientes, un tiempo de carga nocturno (horas en reposo para poder ser cargados) y uso en ciudades y metrópolis, las cuales tienen cada vez mayor cantidad de restricciones ambientales y de ruido para vehículos a combustión interna. Se realizó el cruce de información entre las necesidades operacionales del cliente 1 y 2, junto con la oferta de camiones eléctricos en el mercado, dando como resultado los mostrados en la sección 4.1, por lo que existe hoy en día, tanto en México como en Chile, una amplia variedad de marcas y modelos que cumplen las características operacionales para logística de última milla, a pesar de su diferencia en capacidad de carga en relación a su contraparte diesel.

Los camiones eléctricos suelen perder carga útil debido al peso muerto de las baterías, que a pesar de estar descargadas, siguen siendo peso vehicular, quitando hasta casi el 10 % de la carga útil. A modo de ejemplo, el Volvo FL electric es la versión eléctrica del modelo FL, donde este último tiene una carga útil de 13 toneladas en ciertas versiones, la cual, la versión eléctrica tiene 1 tonelada menos de carga útil.

Debido que los recorridos de última milla no tienen distancias superiores a 100 km en su ruta total diaria (centro de distribución a clientes a centro de distribución), las baterías de los camiones en oferta suelen ser suficientes para realizar la operación diaria, inclusive en algunos casos de dos días de autonomía seguidos sin ningún tipo de carga en ciudad ni en el centro de distribución, aún sobredimensionando la necesidad energética en un 30 % para cubrir el desgaste producido por la operación en las baterías, por lo que las baterías en los camiones eléctricos actualmente están sobredimensionados para un uso en logística de última milla.

Las tasas de aceptación o potencia de carga son distintas entre fabricantes, por lo que algunas opciones pueden tener cargas AC y DC, otras solo AC o solo DC, por lo que el dimensionamiento de la infraestructura de carga depende del camión dimensionado y de la capacidad operacional de las generadoras de carga en la gestión nocturna de estos camiones,

por esta razón los cargadores fueron dimensionados con un tiempo 20 % superiores al requerido por el camión para tener un margen de error operativo razonable para el cliente. La cantidad de cargadores dimensionados por camión pueden observarse en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6.

El SoC o estado de carga del camión depende tanto del estilo de manejo del conductor, carga, topología de la ruta y condiciones ambientales. Se realizó una estimación lineal de estas condiciones, mostrando el perfil de carga de la batería en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, donde se observó que la mayor diferencia en el perfil se encuentra en la característica de tasa de aceptación, donde una carga rápida, o DC, genera una curva con una pendiente positiva mayor que en carga lenta, o AC. En ambos casos de carga rápida o lenta, el porcentaje de batería en el día se encuentra cerca de los márgenes de 80 % y 20 %, por lo que una carga en ciudad no es requerido. Se observó también que las condiciones tanto topológicas como ambientales en ambas ciudades, al no ser extremas, no afecta de manera significativa la carga o descarga de estos camiones, siendo menores al margen de error operativo.

Finalmente se observó que las mantenciones para los vehículos eléctricos son mucho más simples y rápidas, ya que poseen menos partes móviles y menos diferencias de temperatura en materiales, por lo que la disponibilidad esperada del camión eléctrico es ligeramente mayor al del camión a diesel.

## 6.2. Resultados de emisiones en camiones eléctricos

Como es de esperar, la sumatoria de emisiones de un vehículo eléctrico fueron generalmente menores que su contraparte a diesel, siendo entre un 47 % y 59 % para el cliente 1, 22 % y 43 % para la flota 1 del cliente 2 y un -10 % y 46 % para la flota 2 del cliente 2. El caso de la flota 2 del cliente 2 une tres características esenciales para que esto suceda: 1) Los vehículos a diesel son muy eficientes en sus recorridos y 2) La matriz energética del cliente 2 no es muy limpia. 3) Los camiones eléctricos pequeños no son eficientes en general. Estos factores reducen la diferencia de emisiones, mostrando que en ciertos casos particulares, los eléctricos pueden ser más contaminantes, esto es sin contar las emisiones generadas en la fabricación de cada tecnología. Es interesante mostrar que no en todos los casos un camión eléctrico es más sustentable en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> que un camión convencional o a diesel.

Para empresas o entidades que requieren cumplir metas de descarbonización, normas de contaminación o ruido en sectores restringidos en ciudades, por políticas empresariales, o bien, marketing, una solución con camiones eléctricos es recomendado, ya que, en general, disminuye el CO<sub>2</sub> liberado en relación a su contraparte diesel, llegando a ser cero dentro de la misma ciudad, reduce en casi 20 db los máximos de ruidos ambientales y puede lograr una mejor imagen por el uso de vehículos más sustentables con el medio ambiente.

## 6.3. Resultados del análisis económico

El costo total de propiedad para los clientes 1 y 2 son negativos, como se puede observar de las tablas 4.18, 4.19 y 4.20, debido al alto impacto del CAPEX necesario para la compra de los camiones, el cual no puede ser revertido por la ganancia en disminución de costos

operacionales, osea OPEX, en particular de costos energéticos.

Es posible que flotas eléctricas sean rentables económicamente en logística de última milla mediante dos maneras: 1) Disminución del CAPEX camión (inversión del camión eléctrico) o 2) Aumento de la distancia recorrida anual, tal como se observa en la tabla 5.5. El punto 2 es inviable en el caso de logística de última milla, ya que el cliente ya posee una optimización en rutas y tiempos de carga y descarga para sus propios clientes finales, por lo que un recorrido mayor implicaría un mayor uso de los camiones, que es inviable por la cantidad de horas semanales máximas trabajadas en cada país.

El punto 1 mencionado anteriormente (disminución de CAPEX hoy) se puede lograr mediante estrategias comerciales entre la empresa y el fabricante, logrando una disminución mediante menores utilidades por parte del fabricante/representantes en economías de escala o realizar camiones con dimensionamiento de baterías a medida para cada cliente, requiriendo así menos baterías y logrando una disminución de costo de fabricación.

El alto costo de los camiones se debe a distintas variables, las cuales son: 1) La normativa que obliga a los fabricantes a tener un representante en los países, los cuales tienen utilidad por la gestión. 2) Debido que los camiones incorporan nuevas tecnologías, usualmente no probadas en largos tiempos de operación, conlleva a riesgos y gastos por garantías. 3) El costo de manufactura de las baterías sigue siendo alto, el cual el fabricante de camiones debe incorporar en el costo final.

Es posible una disminución del CAPEX mediante una gestión fina de las rutas de cada cliente, requiriendo una cantidad exacta de energía para dicha operación, y por ende, un requerimiento menor en cargadores eléctricos, aunque el impacto no es significativo en el TCO debido al porcentaje de inversión de los cargadores en relación al costo del camión.

La competitividad económica por parte del mantenimiento aumenta a medida que se realiza un mayor kilometraje anual, debido que el costo y requerimientos técnicos para el mantenimiento del camión eléctrico son substancialmente menores al del camión diesel, entre un 18 % y un 23 % del valor del mantenimiento diesel. Debido que la logística de última milla se caracteriza por su uso urbano, en ciudad, realizando pocos kilómetros en relación a viaje de larga distancia, no se percibe un gran impacto económico de este beneficio por parte del camión eléctrico, siendo ampliamente superado por el costo de la inversión.

Finalmente se menciona que por demanda y economías de escala, el valor de la batería disminuye a medida que se van desarrollando en masa, logrando disminuciones de CAPEX en el futuro, resultando en una competitividad económica entre camiones eléctricos en relación al diesel, tal como se observa en las figuras 5.1, 5.3 y 5.5, los que muestran que, si la disminución del valor del camión eléctrico es constante en el tiempo (debido a una disminución del valor de la batería), los clientes 1 y 2 logran una competitividad económica favorable con camiones eléctricos entre el 2021 y 2023, considerando las características de operaciones actuales.

# Capítulo 7

## Mejoras y estudios aplicables al proyecto

El actual estudio técnico-económico de camiones eléctricos en logística de última milla abre nuevas preguntas y nuevos desafíos de investigación, junto con nuevos análisis del mismo para una precisión mayor a futuro, con mayor información de proveedores y clientes.

Estudios interesantes a realizar sería un análisis técnico económico de camiones eléctricos en logística de larga distancia, considerando restricciones de carga y carga útil transportada, autonomía y los beneficios comentados en la sección de resultados sobre la disminución de costos por mantención en relación al kilometraje anual.

Análogo a lo anterior, el análisis realizado sería interesante con nuevas tecnologías, como vehículos a hidrógeno, mencionando el hidrógeno gris y verde en el mercado actual, su impacto en las emisiones de  $CO_2$  y la diferencia entre un eléctrico a baterías y uno a hidrógeno, en relación al vehículo diesel.

Actualmente en Chile, la opción de realizar modificaciones a vehículos a combustión interna para transformarlos en vehículos eléctricos está prohibido, sería interesante ver el impacto económico y técnico si esta restricción sea eliminada.

Finalmente es necesario mencionar que en este estudio se realizó una serie de asunciones lineales, los cuales pueden ser caracterizados con mayor precisión con la ayuda de datos reales en flotas de camiones eléctricos, en cada país, como por ejemplo el desgaste de las baterías, el perfil SoC y el valor real de OPEX.

# Bibliografía

- [1] U.S department of energy. How do all-electric cars work, sep 2020. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>.
- [2] Enel X. The different ev charging connector types, apr 2019. <https://evcharging.enelx.com/eu/about/news/blog/552-ev-charging-connector-types>.
- [3] Comisión nacional de energía. *Anuario estadístico de energía 2019*. Ministerio de energía, 2019.
- [4] Ministerio del medio ambiente. Sector energía, sep 2020. <http://solar.minenergia.cl/inicio>.
- [5] Bloomber NEF. *Electric Vehicle Outlook 2020*. Bloomberg, 2020.
- [6] Capgemini. The last mille delivery challenge, sep 2020. <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2019/01/Report-Digital-%E2%80%93-93-Last-Mile-Delivery-Cha>.
- [7] Instituto Nacional de Estadísticas. Cifras de transporte de carga por carretera 2018, dec 2020. [https://www.ine.cl/docs/default-source/estructura-del-transporte-por-carretera/infografias/documentos/infograf%C3%ADa-transporte-de-carga-por-carretera-2018.pdf?sfvrsn=5f38c32\\_2](https://www.ine.cl/docs/default-source/estructura-del-transporte-por-carretera/infografias/documentos/infograf%C3%ADa-transporte-de-carga-por-carretera-2018.pdf?sfvrsn=5f38c32_2).
- [8] El mostrador. La última milla, el talón de aquiles del e-commerce, aug 2020. <https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2020/08/05/la-ultima-milla-el-talon-de-aquiles-del-e-commerce/>.
- [9] GEP Insight Drives Innovation. 6 key benefits of third-party logistics (3pl) in supply chain management, sep 2019. <https://www.gep.com/blog/mind/6-key-benefits-of-third-party-logistics-3pl-in-supply-chain-management>.
- [10] Coordinación de Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT). Camiones, camionetas y furgones, dec 2020. <https://www.transporteinforma.cl/atencion-de-usuarios/restriccion-2020/camiones-camionetas-y-furgones/>.
- [11] La jornada. Restricciones para el transporte de carga en cdmx en 2020, conócelas, dec 2020. <https://www.jornada.com.mx/ultimas/tiempo-de-industria/2020/01/03/restricciones-para-el-transporte-de-carga-en-cdmx-en-2020-conocelas-220>.

html.

- [12] Jurgena I Berjoza D. Influence of batteries weight on electric automobile performance. *Engineering for rural development*, 2017.
- [13] Federal Highway Administration. Vehicle weight classes & categories, sep 2020. <https://afdc.energy.gov/data/10380>.
- [14] Grasman E. Juan A.; Mendez C.; Faulin J.; De Armas J. Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *energies*, 2016.
- [15] Korzhenevych A.; Dehnen N.; Bröcker J.; Holtkamp M.; Meier H.; Gibson G.; Varma A.; Cox V. Update of the handbook on external costs of transport. *Ricardo-AEA/R/ED57769*, 2014.
- [16] Figliozzi M.A. The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics and costs. *elsevier*, 2010.
- [17] Volvo. Electromobility made easy, electrified urban transport by volvo trucks, sep 2020. [https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo/volvo-2952/global/alternative-fuels/electric-trucks/Volvo\\_Trucks\\_Product\\_Guide\\_Electromobility\\_en-EN.pdf](https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo/volvo-2952/global/alternative-fuels/electric-trucks/Volvo_Trucks_Product_Guide_Electromobility_en-EN.pdf).
- [18] LI J.Q. Transit bus scheduling with limited energy. *Transportation Science*, 2013.
- [19] Omprakash Upadhyay. Why battery swapping is bad for electric vehicle, oct 2019. <https://www.linkedin.com/pulse/why-battery-swapping-good-electrical-vehicle-omprakash-upadhyay/>.
- [20] M. John Hodgson. A flow-capturing location-allocation model. *Geographical Analysis*, 1990.
- [21] Hosseini M.; MirHassani S.A. Selecting optimal location for electric recharging stations with queue. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015.
- [22] Chocteau V.; Drake D.; Kleindorfer P.; Orsato R.J.; Roset A. *Collaborative Innovation for Sustainable Fleet Operations: The Electric Vehicle Adoption Decision*. INSEAD, 2011.
- [23] Wang C.; Wang Y. Locating passenger vehicle refueling stations. *Transportation Research*, 2010.
- [24] Wang C.; Figliozzi M. An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the usa market. *Transportation Research*, 2013.
- [25] *Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles.*, volume Proceedings of the EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric

Vehicle Symposium., Stavanger, Norway., may 2009.

- [26] Planete energies. What is the energy mix?, jul 2020. <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/what-energy-mix>.
- [27] Rex A. Hudson. Geography, jan 1994. <http://countrystudies.us/chile/36.htm>.
- [28] Generadoras de Chile. Generación eléctrica en chile, dec 2020. [http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile#:~:text=Sistema%20El%C3%A9ctrico%20Nacional%20\(SEN\)%3A,del%20Norte%20Grande%20\(SING\).&text=Sistema%20de%20Magallanes%20\(SEM\)%3A,y%20de%20la%20Ant%C3%A1rtica%20Chilena](http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile#:~:text=Sistema%20El%C3%A9ctrico%20Nacional%20(SEN)%3A,del%20Norte%20Grande%20(SING).&text=Sistema%20de%20Magallanes%20(SEM)%3A,y%20de%20la%20Ant%C3%A1rtica%20Chilena).
- [29] Comisión Nacional de Energía. Factores de emisión, sep 2020. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>.
- [30] Ministerio de energía. Uso de energía solar en chile, dec 2020. <https://www.aprendeconenergia.cl/uso-de-energia-solar-en-chile/>.
- [31] Biblioteca del congreso nacional de Chile. Ley 21118 modifica la ley general de servicios eléctricos, con el fin de incentivar el desarrollo de las generadoras residenciales, nov 2018. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1125560>.
- [32] Biblioteca del congreso nacional de Chile. Plan de descarbonización y estrategia transición justa y sostenible, jun 2020. [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29300/1/BCN\\_Plan\\_de\\_descarbonizacion\\_y\\_Estrategia\\_de\\_transicion\\_justa\\_Dip.R.Gonzalez\\_2020\\_FINAL.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29300/1/BCN_Plan_de_descarbonizacion_y_Estrategia_de_transicion_justa_Dip.R.Gonzalez_2020_FINAL.pdf).
- [33] Rudnick H. Sandoval P. Cortez V., Lobos N. ¿es cuestionable la aplicación de la teoría marginalista en chile?, dec 2020. <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno15/marg/ImpactoERNC.html>.
- [34] Banco Mundial. Acceso a la electricidad ( <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=MX>).
- [35] Petroquimex. Transmisión, la gran olvidada del sector eléctrico mexicano, dec 2019. <https://petroquimex.com/transmision-la-gran-olvidada-del-sector-electrico-mexicano/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Programa,ciento%20m%C3%A1s%20que%20en%202017>.
- [36] Gobierno de México. El gobierno de México avanza en la política energética para garantizar a la población el acceso a los servicios básicos de energía, oct 2020. <https://tinyurl.com/ybfjfrna>.
- [37] Gobierno de México. Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2019, feb 2019. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/538473/Factor\\_emision\\_electrico\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/538473/Factor_emision_electrico_2019.pdf).
- [38] Sean Cassady. Internal combustion engines, dec 2016. <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/cassady2/>.



- [39] R. Somerville U. Cubasch Y. Ding C. Mauritzen A. Mokssit T. Peterson Le Treut, H., S. D. Qin M. Manning Z. Chen M. Marquis K.B. Averyt M. Tignor M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, United Kingdom H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, and USA. New York, NY.
- [40] ECOSCORE. How to calculate the co2 emission from the fuel consumption?, sep 2020. <https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2>.
- [41] GRACO. How to calculate total cost of ownership, sep 2020. <https://www.graco.com/us/en/in-plant-manufacturing/solutions/articles/how-to-calculate-total-cost-of-ownership.html>.