



Programa Clima y Aire limpio
en Ciudades de América Latina

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BUSES ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE SANTIAGO RED



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE


swisscontact

CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BUSES ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE SANTIAGO RED

Documento elaborado en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 1) financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE y ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico - Swisscontact

El presente documento es de carácter informativo y no necesariamente refleja los puntos de vista u opiniones de las organizaciones y gobiernos participantes.

Las denominaciones utilizadas y la presentación del material de esta publicación no implican en lo absoluto la expresión de ninguna opinión sobre el estatus legal de un país, territorio, ciudad o área, sobre sus autoridades.

Elaborado por:

Juan Pablo Romero Campos
Paulina Ramírez Del Barrio

Revisado por:

Adrián Montalvo
Director Programa CALAC+

Freddy Koch
Coordinador On-Road CALAC+

Carol Arenas Ibarra
Coordinadora CALAC+ para Chile

Fotografía de Portada:

Paradero de buses, Santiago de Chile (arriba).

Edición: noviembre 2020

LOS TEXTOS PUEDEN SER MENCIONADOS TOTAL O PARCIALMENTE CITANDO LA FUENTE

Índice

1. Resumen ejecutivo	5
2. Glosario	6
3. Introducción	7
4. Objetivo general	8
4.1. Objetivos específicos	8
5. Alcances	9
6. Antecedentes y revisión bibliográfica	10
6.1. Análisis de ciclo de vida (LCA)	10
6.2. Contextualización <i>LCA</i> flotas eléctricas	11
6.3. Contextualización <i>LCC</i> flotas eléctricas	12
6.4. Comparación metodológica del análisis de ciclo de vida	12
6.4.1. Etapa de definición de objetivos y alcances	12
6.4.2. Etapa de análisis de inventario de ciclo de vida	14
6.4.3. Evaluación de impacto ambiental	14
6.4.4. Selección de metodología para <i>LCA</i>	16
6.5. Costo de ciclo de vida (<i>LCC</i>)	16
7. Metodología para realización del estudio	18
7.1. Aplicación de algoritmos de IA (Inteligencia Artificial) para predecir <i>SOC</i>	18
7.2. Desarrollo <i>LCA</i>	20
7.3. Generación de datos a partir de modelos matemáticos-computacionales	20
7.4. Aplicación metodológica tradicional	21
7.5. Evaluación económica	22
8. Modelo conceptual de <i>LCA</i> y <i>LCC</i> de flotas eléctricas	23
8.1. Diagrama <i>LCA</i> buses eléctricos	23
8.2. Diagrama <i>LCA</i> buses diésel	24
8.3. Modelo de costo de ciclo de vida (<i>LCC</i>) para buses eléctricos	24
8.4. Modelo de costo de ciclo de vida (<i>LCC</i>) para buses diésel	25

8.5.	Variables consideradas en el modelo	26
9.	Pronósticos a corto plazo para el SOC	27
9.1.	Aprendizaje automático y modelos de pronóstico basados en redes neuronales	27
9.1.1.	Métricas para el problema de regresión	28
9.1.2.	Proceso de entrenamiento	28
9.2.	Procesamiento de los datos y consideraciones	32
9.3.	Resultados de pronóstico del SOC	34
10.	Costes de buses eléctricos y EURO VI, y comparación entre ambas tecnologías	36
10.1.	Definiciones de los costos involucrados	36
10.2.	Compra	36
10.3.	Fase de Uso	37
10.4.	Fase de reciclaje o fin de vida útil	38
11.	LCA y LCC clásicos	39
11.1.	LCA resultados: unidad funcional extracción	39
11.1.1.	LCA resultados extracción: Habitáculo	40
11.1.2.	LCA resultados extracción: Tren de poder diésel	41
11.1.3.	LCA resultados extracción: Tren de poder Eléctricos	42
11.2.	LCA resultados: procesos de manufactura	44
11.2.1.	LCA resultados manufactura: Habitáculo	46
11.2.2.	LCA resultados manufactura: Tren de poder diésel	47
11.2.3.	LCA resultados manufactura: Tren de poder eléctrico	48
11.3.	LCA resultados: Fase de uso	49
11.4.	LCA resultados: Fase de fin de vida útil	53
11.4.1.	Reciclaje	53
11.4.2.	Reutilización de la batería	55
11.5.	LCA resultados: Comparación entre ambas tecnologías	55
11.6.	LCC: Modelo de eco costo y metodología de acople	59
12.	Resultados TCO	62
12.1.	Proceso de simulación de fase de uso	62

12.2.	Resultados de TCO	65
12.3.	TCO con sensibilidad de escenarios	66
13.	Conclusiones y trabajo futuro	70
	Bibliografía	72
	Anexo A: Encuesta a operadores de flotas eléctricas	75
	Anexo B: Tablas de <i>LCA</i>	79

1. Resumen ejecutivo

La electromovilidad en Chile ha alcanzado una gran relevancia en los últimos años. Esta relevancia es en el contexto de la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y en el desarrollo de políticas públicas de mediano y largo plazo para descontaminar las grandes ciudades del país. Existe la necesidad de generar herramientas de información para apoyar la toma de decisiones al momento de seleccionar las tecnologías que permitan conseguir descontaminar la matriz energética del país en el sector transporte y particularmente en el transporte público.

Este estudio entrega información de análisis de ciclo de vida y costo de ciclo de vida para determinar los costos totales de la propiedad o TCO (en inglés) las tecnologías de transporte diésel y eléctrica que actualmente se están utilizando en la red de buses del transporte público metropolitano de Santiago con el fin de suplir en parte la necesidad de herramientas de información que permitan comparar e identificar las fortalezas y debilidades de estas tecnologías para la toma de decisiones.

El análisis de ciclo de vida (LCA) y costo de ciclo de vida (LCC) son metodologías que permiten cuantificar el impacto medio ambiental de un activo a lo largo de toda su vida útil y evaluar los costos y beneficios a lo largo de su ciclo de vida. En el estudio se realiza el desarrollo tanto de LCA como LCC. En este desarrollo se considera todo el ciclo de vida, es decir, desde la extracción de materiales de fabricación, hasta el reciclaje y desecho del activo. Estas metodologías, para su aplicación, requieren el uso herramientas computacionales para el manejo de grandes cantidades de datos y estudiar el cómo se gestiona la energía en una flota eléctrica a modo de predecir cómo es su consumo. Se utilizó el aprendizaje profundo, como una rama de la inteligencia artificial, para auditar y trabajar los datos operacionales de flotas eléctricas y con ello, predecir su consumo energético para las estimaciones de emisiones y costos durante la fase de uso de las tecnologías.

Para el estudio se consideró: datos del proyecto de monitoreo de flotas eléctricas y convencionales del Ministerio de Energía; datos bibliográficos provistos por los fabricantes de los vehículos en las hojas de datos y manuales, así como de literatura académica sobre las fases de manufactura y deposición; información operacional y de mantención obtenida mediante entrevista a los operadores de flotas de buses en Santiago; información de los sistemas de carga de los vehículos; y composición de la matriz energética de generación de electricidad del país para suministro de energía a los sistemas de carga así como la exigencia en la última licitación de transporte público que indica que el suministro eléctrico debe ser 100% renovable.

Los resultados del estudio muestran que el impacto medioambiental de la tecnología de buses eléctricos depende en gran manera del tipo de fuente de energía. Si se considera la matriz energética actual de Chile, un bus diésel es menos contaminante que un bus eléctrico considerando su ciclo de vida completo. Pero si se considera que la fuente de suministro es 100% renovable, la tecnología eléctrica, en su fase de uso, disminuye las emisiones a menos de una cuarta parte de las emisiones de la tecnología diésel, resultando en menores emisiones contaminantes a lo largo de todo su ciclo de vida. Complementariamente, las flotas eléctricas son energéticamente más eficientes y desde el punto de vista económico, pese a poseer un costo de compra más elevado, presentan menores costos de operación y mantención, resultando en un menor costo total de propiedad en comparación con las flotas diésel.

Finalmente, se identifica que una inclusión paulatina de flotas eléctricas en conjunto con una descarbonización de la matriz energética de Chile permitirá que los buses eléctricos sean un agente clave en la disminución de emisiones contaminantes y la mejora de vida de las grandes ciudades.

2. Glosario

En esta sección se presenta una lista de definiciones para los términos empleados a lo largo del documento, ordenadas por orden alfabético:

- 1) **BP NN**: *Back propagation neural network*. Sigla en inglés para redes neuronales de retro-propagación.
- 2) **CNN**: *Convolutional neural network*. Sigla en inglés para redes neuronales convolucionales.
- 3) **CFC**: Clorofluorocarbono.
- 4) **EURO VI**: Es una normativa de protección medioambiental que entró en vigor en septiembre de 2015. Su propósito es limitar las emisiones de ciertos gases contaminantes que emiten los vehículos de carretera. Con respecto a vehículos diésel de la categoría M y N1, (buses y camiones pesados), se incorporan filtros de partículas y SCR que permiten reducir de manera significativa las emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno.
- 5) **EV**: es el acrónimo para denotar al vehículo eléctrico, en inglés Electric Vehicle.
- 6) **ICE**: es el acrónimo para denotar al motor de combustión interna, en inglés Internal Combustion Engine.
- 7) **LCA**: es el acrónimo para denotar al análisis de ciclo de vida, en inglés Life Cycle Assessment.
- 8) **LCC**: es el acrónimo para denotar al costo de ciclo de vida, en inglés Life Cycle Cost.
- 9) **NaN**: es el acrónimo para denotar a No es un Número, en inglés Not a Number.
- 10) **NN**: es el acrónimo para denotar a redes neuronales, en inglés Neural Networks.
- 11) **Outliers**: Valor atípico.
- 12) **Overfitting**: Sobre ajuste.
- 13) **PHEV**: es el acrónimo para denotar al vehículo híbrido eléctrico enchufable, en inglés Plug-in Hybrid Electric Vehicle.
- 14) **SOC**: es el acrónimo para el estado de carga de las baterías, en inglés State of Charge.
- 15) **TCO**: es el acrónimo para costo total de propiedad, en inglés Total Cost of Ownership.
- 16) **Underfitting**: Ajuste pobre o de baja calidad.

3. Introducción

En los últimos años los problemas medio ambientales están cobrando cada vez mayor relevancia en la sociedad. Los países partícipes del acuerdo de París han propuesto como objetivos reducir las emisiones de CO_2 en un 40% para 2030 y llegar a la barrera cero en 2050 (Rhodes, C. J. 2016, [1]). En este contexto se han promovido políticas públicas como el uso de fuentes de energía menos contaminantes y el fomento de la electromovilidad.

Chile, como país integrante de la Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas, ha establecido metas de recambio de transporte público por electromovilidad y ha comenzado a operar las primeras flotas de buses eléctricos en Latinoamérica. Ante este escenario surgen preguntas sobre el efecto de esta medida en la disminución de emisiones. ¿Las flotas eléctricas ayudan a mitigar el cambio climático?, ¿cómo cuantificar esta mitigación?, ¿qué beneficios económicos para la sociedad tiene esta medida?, y finalmente, ¿cómo se gestiona la energía de una flota eléctrica en Chile?

El análisis de ciclo de vida y costo de ciclo de vida son metodologías modernas de estudio que permiten cuantificar el impacto medio ambiental de un activo a lo largo de toda su vida útil y evaluar los costos y beneficios a lo largo de su ciclo de vida respectivamente. Estas metodologías permitirían dar respuesta a las preguntas anteriores. Sin embargo, para su aplicación, se debe subsanar la dificultad para el manejo de grandes cantidades de datos y estudiar el cómo se gestiona la energía en una flota eléctrica a modo de predecir cómo es su consumo. Para sortear estos inconvenientes se propone usar aprendizaje profundo.

El aprendizaje profundo es una rama de la inteligencia artificial que busca imitar mediante algoritmos la forma de aprender de los humanos como sinónimo de redes neuronales, permite auditar y trabajar los datos operacionales de flotas eléctricas y con ello, predecir su consumo energético. Permitiendo a su vez comparar el impacto medio ambiental y socioeconómico entre flotas eléctricas y Euro VI diésel en Chile. Todo esto con el objetivo final de poder producir una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en políticas públicas de promoción de la electromovilidad.

En este documento se presenta el desarrollo del análisis de costo de ciclo de vida en base al LCA e inteligencia artificial, desde su concepción conceptual hasta su ejecución.

4. Objetivo general

Elaborar el análisis de ciclo de vida y costo de ciclo de vida de buses del sistema de transporte de Santiago RED (ex Transantiago) y realizar una comparación con los buses de tecnología EURO VI que también están siendo analizados como parte de la flota de estudio de la misma red.

4.1. Objetivos específicos

- Definir las rutas de flota eléctrica y convencional que serán parte del estudio.
- Definir supuestos para el ciclo de vida de una flota eléctrica y convencional en Chile.
- Determinar los costos de inversión y operación de los buses eléctricos y EURO VI de RED. Realizar la comparación entre ambas tecnologías y emitir conclusiones.
- Realizar análisis de ciclo de vida y costo de ciclo de vida tradicional para rutas del estudio.
- Construir mediante inteligencia artificial un algoritmo generalizado que permita predecir el delta *SOC*, categorías de impacto ambiental, económicas y sociales de una flota eléctrica para una ruta dada en Chile y comparar estos resultados con las flotas convencionales.
- Elaborar una herramienta para realizar análisis de ciclo de vida de buses eléctricos comparados con buses de combustión interna.
- Incluir en el análisis de ciclo de vida los costos ambientales de la tecnología.

5. Alcances

En base a la información generada por el Centro de Energía, la proporcionada por los fabricantes de vehículos, las rutas de operaciones y los sistemas de carga de baterías, se realizará un estudio a fin de obtener la siguiente información:

- Métricas de desempeño medio ambiental según los métodos CML (*baseline*) y *eco-indicators*.
- La evaluación de las métricas ambientales se realizará usando el software GaBi, de no estar disponible, se usará la librería Brightway2 de acceso libre en Python.
- Se considera todo el ciclo de vida de las flotas para evaluar su impacto ambiental, es decir, desde la extracción de materiales hasta el reciclaje y desecho del activo.
- Los resultados obtenidos estarán referidos a los datos de uso de las flotas eléctricas recopilados por el Centro de Energía, lo cual le dará un carácter experimental al estudio.
- Para el caso de buses eléctricos:
 - Costos de inversión. En los que se incluya todos los costos del vehículo.
 - Costo de la batería. En el que también se incluya en una proyección durante el ciclo de vida del bus, la reposición de batería de acuerdo con las bitácoras de mantenimiento y reposición dados por fábrica.
 - Costo del sistema de carga. Tanto costo de inversión prorrateado por el número de buses que utilizan el sistema como los costos de operación y mantenimiento.
 - Costos de energía suministrada a los buses.
 - Costos de operación y mantenimiento del bus. En base a datos reales de mantenimiento y reposición de repuestos como de bitácoras de mantenimiento, sobre todo para la proyección en la vida útil del bus.
 - Otros costos que no estén especificados en la lista solicitada.
- Para el caso de buses convencionales:
 - Costos de inversión. En los que se incluya todos los costos del vehículo.
 - Costos del combustible suministrado a los buses.
 - Costos de operación y mantenimiento del bus. En base a datos reales de mantenimiento y reposición de repuestos como de bitácoras de mantenimiento, sobre todo para la proyección en la vida útil del bus.
 - Costo ambiental (emisiones).

6. Antecedentes y revisión bibliográfica

En esta sección se presentan los conceptos de análisis de ciclo de vida (*LCA*) y costo de ciclo de vida (*LCC*). Se realiza una comparación de los distintos métodos de aplicación de cada etapa del *LCA* para definición de unidad funcional, generación de inventario de datos y cálculo de indicadores medio ambientales. El resultado del *LCA*, los impactos medio ambientales, son cuantificables económicamente mediante el *LCC*.

6.1. Análisis de ciclo de vida (*LCA*)

El análisis de ciclo de vida o *LCA* (Life Cycle Assessment) es una metodología de estudio que permite evaluar los impactos ambientales asociados a un producto o servicio mediante la cuantificación de los flujos de materia y energía en los distintos procesos que constituyen la vida útil del activo. Las normas que regulan esta metodología son ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Ambas normas están relacionadas y tienen como objetivo establecer un marco normativo para la metodología del *LCA* de un determinado producto o servicio. La primera norma define de forma general, el objeto, alcance, análisis del inventario y la evaluación del impacto. Luego mediante un informe y revisión establece las limitaciones oportunas. A diferencia de la primera, la segunda, se enfoca en casos más concretos, estableciendo los requisitos y directrices específicas para llevar a cabo un *LCA*.

Para el caso de este estudio, la metodología del *LCA* evalúa y cuantifica el impacto ambiental durante el transcurso de cada etapa de la vida del bus eléctrico o bus diésel, es decir, en su fabricación, vida útil, reutilización y reciclaje. Se trata de un proceso estructurado en una serie de fases de trabajo relacionadas entre sí, que siguen las pautas de las ya mencionadas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Estas proporcionan las guías generales para llevar a cabo un *LCA*, dividiéndose en cuatro etapas independientes, como se puede observar en la Figura 6.1.

- Definición del objetivo y alcance
- Análisis del inventario de ciclo de vida
- Evaluación del impacto de ciclo de vida
- Interpretación de los resultados del ciclo de vida.

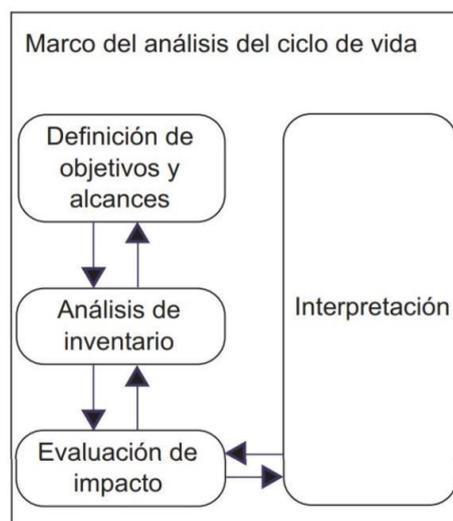


Figura 6.1 Metodología de análisis de ciclo de vida.

Salvo la etapa de interpretación de los resultados, las tres primeras fases del LCA pueden ser realizadas mediante diferentes métodos. En la subsección 6.4 se presentan estas metodologías o enfoques con sus ventajas y desventajas para cada etapa.

6.2. Contextualización LCA flotas eléctricas

A lo largo de los últimos 15 años se han introducido flotas eléctricas en los principales países desarrollados, ya en el año 2002 el poder cuantificar el impacto medio ambiental de estas era un problema por la falta de información. En ese año el gobierno de Estados Unidos ordenó la realización de este tipo de estudios para definir su política pública. En el estudio de *McCleese, D. L., & LaPuma, P. T. (2002). [7]*, se aplica análisis de ciclo de vida en conjunto con simulaciones de Monte Carlo¹ para poder comparar flotas eléctricas con flotas de combustión interna. Las principales variables medidas fueron la energía media por ciclo kJ/km , CO_2/km , SO_2/km , CO/km , NO_x/km , y los compuestos orgánicos volátiles VOC/km y $PM10/km$. En general, se concluye que los automóviles eléctricos, en comparación con los vehículos a combustión, pueden beneficiar la salud pública desde el punto de vista de la generación de CO_2/km y NO_x/km , al reubicar los contaminantes del aire desde los centros urbanos, donde se concentra el tráfico, a las áreas rurales donde generalmente se produce la generación de electricidad.

Posteriormente con el desarrollo de la tecnología de automóviles eléctricos, fue posible realizar mediciones experimentales y no recurrir a simular estas flotas usando Monte Carlo. En el año 2008, en el estudio de *Samaras, C., & Meisterling, K. (2008), [2]*, compararon las emisiones producidas a lo largo de todo el ciclo de vida de automóviles eléctricos híbridos enchufables, no enchufable y de combustión interna. Se midió en este caso solo la producción de CO_2/km . Los resultados no mostraron una significativa disminución de este indicador para el caso de flotas eléctricas.

Con el cambio de década, las baterías de litio empezaron a cobrar mayor relevancia por su mayor capacidad para almacenar energía y con ello la posibilidad de crear mejores automóviles eléctricos. En el año 2010, *Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlienius, J. (2010), [10]*, estudiaron cómo optimizar la fabricación de baterías de litio para autos eléctricos enchufables con el fin de minimizar el impacto medio ambiental de estas a lo largo de toda su vida útil, es decir, desde la extracción de los elementos hasta el reciclaje. Las principales variables medidas fueron CO_2 , smog fotoquímico, SO_2 , P (fósforo) y CFC (Clorofluorocarbono).

Ya para el año 2013 los automóviles eléctricos no híbridos se empezaron a masificar por lo que se realizaron estudios comparativos de impacto medio ambiental de estos con los automóviles convencionales. En el estudio de *Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013), [11]*, desarrollaron y proporcionaron un inventario transparente del ciclo de vida de los productos convencionales y eléctricos, y lo aplicaron para predecir categorías de impacto. En este estudio se concluyó que la fase de producción de vehículos eléctricos demostró ser mucho más ambientalmente intensiva. No obstante, los vehículos eléctricos alimentados con fuentes de energía no contaminantes, en relación con los vehículos a combustión, pueden lograr mejoras generales

¹ Las simulaciones de Montecarlo son un método estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. Su nombre hace referencia al principado de Mónaco que es famoso por sus juegos de azar.

sustanciales en cuanto a calentamiento global, acidificación terrestre, toxicidad humana y otros impactos.

En el mismo año 2013, *Cooney, G., Hawkins, T. R., & Marriott, J. (2013)*, [12], realizó un análisis de ciclo de vida para flotas de buses eléctricos. Los resultados de LCA de este estudio indican que la fase de uso, que consiste en la producción-combustión de diésel para el bus convencional y la generación de electricidad para el bus eléctrico, domina la mayoría de las categorías de impacto medio ambiental.

Ya para el año 2008 los estudios de impacto medio ambiental se han centrado en la medición de los gases, *Samaras, C., & Meisterling, K. (2008)*, [2], evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) de ciclo de vida de PHEV y encontraron que reducen las emisiones de GEI en un 32% en comparación con los vehículos convencionales, pero tienen pequeñas reducciones en comparación con los híbridos tradicionales. Finalmente, en el mismo año *Dér, Antal, et al, 2018*, [3], realizó un estudio del impacto medio ambiental aplicado a flotas de automóviles eléctricos. Los principales contaminantes analizados fueron CO_2 , SO_2 , NO_x , CFC y O_3 . Entre los aportes más significativos, este estudio propuso un análisis de sensibilidad dependiente de la temperatura ambiente y el estilo de conducción de las flotas.

6.3.Contextualización LCC flotas eléctricas

En general los estudios de LCC para electro movilidad comenzaron desde el 2010 centrándose en la evaluación de automóviles eléctricos considerando costos de operación, mantenimiento programado y no programado, adquisición y fin de vida útil. (*Wong, Y. S., Lu, W. F., & Wang, Z. (2010)*, [21]). Posteriormente los estudios se centraron en ver como se ve afectado el costo de ciclo de vida por el uso de baterías de litio, puesto que, se consideraban los elementos más costosos. Este supuesto fue cambiando a lo largo del tiempo como resultado de la masificación del uso de esta tecnología. (*Crist, P. (2012)*, [22]). Finalmente, en los últimos años, después de que los estudios de LCC demostraran que esta tecnología es una alternativa rentable para su implementación y masificación en las ciudades, se han comenzado estudios para cuantificar su impacto social, agregando costos derivados de la reducción de la contaminación del aire. (*Kara, S., Li, W., & Sadjiva, N. (2017)*, [23]).

6.4.Comparación metodológica del análisis de ciclo de vida

El LCA es fundamentalmente un problema de base de datos, pues requiere del entrecruzamiento de varios repositorios de información, para afrontar esta tarea existen diferentes métodos empleados a lo largo de los últimos años, en esta subsección se presentan diferentes enfoques para realizar esta tarea para cada etapa del LCA, y al final se decide por el más adecuado para estudiar el caso de comparar flotas de buses eléctricos y buses diésel Euro VI.

6.4.1. Etapa de definición de objetivos y alcances

Durante la primera fase del LCA “definición de objetivos y alcances” (ver Figura 6.1) se determina la unidad funcional y la frontera del sistema. La unidad funcional corresponde a la medida de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y salidas relacionadas, por

ejemplo, para el caso de la manufactura de acero, la unidad funcional más común es una tonelada de acero manufacturado, por lo que los resultados medioambientales están siempre referidos a esta unidad. Con respecto a la frontera del sistema, este término hace referencia a las condiciones de borde del estudio, vale decir, qué etapas del ciclo de vida se están analizando.

Para el caso del LCA de una flota eléctrica y diésel Euro VI se presenta la siguiente tabla comparativa de posibles unidades funcionales.

Tabla 6.1 Posibles unidades funcionales

Unidades funcionales	Ventajas	Desventajas
1000 kg de flota eléctrica ²	Es una unidad funcional estándar en muchos estudios.	Puede generar problemas de representatividad en este estudio particular al ser una cantidad de masa menor a un bus. Difícil de interpretar para personas no familiarizadas con el LCA. (Samaras, C., & Meisterling, K. (2008), [2]).
Vehículo eléctrico	Corresponde a una mejora de la unidad funcional anterior. Es fácil de interpretar	Requiere tener en cuenta distintos modelos vehiculares. No permite comparar adecuadamente tecnologías eléctricas con diésel Euro VI. Puesto que estas tecnologías tienen pesos distintos. (Dér, Antal, et al, 2018 [3])
100km - 200km de uso de flota eléctrica estándar europeo ³	Es una unidad funcional ampliamente usada en problemas automovilísticos.	Se ha observado una fuerte subestimación de la energía consumida No es fácil de interpretar. (Chen, J. L., & Liau, C. W. (2001, December), [4])
100km - 200km de uso de flota eléctrica promedio.	Es una unidad funcional ampliamente usada en problemas automovilísticos. Corresponde a una mejora de la unidad funcional anterior	Requiere de datos experimentales No es fácil de interpretar (Bartolozzi, I., Rizzi, F., & Frey, M. (2013), [5])

²1000 kg de flota eléctrica hace referencia a tomar 1000 kg de un bus eléctrico o diésel como unidad funcional. Es un método que se usa mucho para componentes pequeños para normalizar y ayudar al cálculo como por ejemplo el mouse de un computador (que pesa mucho menos que 1000 kg). Para el caso de un bus diésel o eléctrico que pesan sobre los 10000 kg no sirve este método.

³ El estándar europeo de conducción es un ciclo de conducción ficticio que se ocupa para hacer mediciones estandarizadas sobre las tecnologías vehiculares. En Kamble, S. H., Mathew, T. V., & Sharma, G. K. (2009), Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(2), 132-140 se critica su representativo de la realidad. Otro ejemplo la diferencia de autonomía antes y después de un viaje, con respecto a la realidad para los vehículos Tesla, pues se calcula sobre la base de este estándar.

6.4.2. Etapa de análisis de inventario de ciclo de vida

En la segunda fase del LCA “Análisis de inventario” (ver Figura 6.1) se pretende recopilar la información relevante desde el punto de vista medio ambiental de los procesos identificados dentro del límite del sistema que se analiza. Para manejar y proyectar por toda la vida útil estos datos, existen diferentes formas de proceder. Para el caso del análisis de ciclo de vida de una flota eléctrica y diésel Euro VI se presenta la siguiente tabla comparativa de metodologías de inventario de datos.

Tabla 6.2 Posibles metodologías de inventario de datos

Metodologías de inventario o generación de datos	Ventajas	Desventajas
Uso de datos del fabricante.	Es lo más ampliamente usado para el análisis de ciclo de vida. Fácil de realizar y requiere poco tiempo para ser empleado	Aproximaciones constantes que pueden involucrar errores muy grandes. <i>(Ivanov, O. L., Honfi, D., & Stripple, H. (2018), [6])</i>
Uso de simulaciones de Montecarlo y datos del fabricante para generación de datos.	Permite modelar sin la necesidad de aproximar datos.	Requiere un gran poder computacional. Los resultados no han sido del todo satisfactorios <i>(McCleese, D. L., & LaPuma, P. T. (2002), [7])</i>
Uso de aprendizaje de máquinas en base a datos operacionales medidos.	Es muy bueno ajustándose a la realidad.	Se requiere uso de datos experimentales. <i>(Wu, J. D., & Liu, J. C. (2012), [8])</i>

6.4.3. Evaluación de impacto ambiental

Los impactos ambientales son evaluados en la tercera etapa, donde, a través de un sistema de puntuación en el cual se le tributan (asignación ponderada) las cargas ambientales los distintos procesos según su porcentaje másico, energético o volumétrico, se determina el impacto dentro de la categoría estudiada. También se puede emplear el método de normalización, donde es posible evaluar la relevancia o el impacto ambiental de los procesos y de los productos respecto a los valores de referencia.

Los indicadores medio ambientales que se pueden evaluar son:

- Acidificación (kg SO_2 equivalente): Consiste en la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuros en la atmósfera, en suelo y en agua, dónde puede variar la acidez del medio, lo que afectará la flora y fauna que habita en él, produce deforestación y también puede afectar a los materiales. (Lamana, N. R., & Aja, A. H. (2010), [9]).
- Cambio Climático (kg CO_2 equivalente): La tierra absorbe la radiación del sol. Esta energía es redistribuida por la atmósfera y los océanos y retornada en forma de radiación de infrarrojo térmico. Parte de esta radiación es absorbida por los gases existentes en la atmósfera provocando el calentamiento del planeta, a este fenómeno se denomina efecto invernadero. Estos gases son principalmente el CO_2 y el vapor de agua. (Lamana, N. R., & Aja, A. H. (2010), [9])
- Ecotoxicidad (kg de unidades tóxicas (UT) equivalente): es la resultante de todos los estreses tóxicos que actúan sobre el ambiente. El principio de la ecotoxicología es que los organismos vivos son herramientas esenciales para la evaluación de la calidad ambiental, puesto que ellos son los que están expuestos a los efectos combinados de la ecotoxicidad.
- Uso de energía (kJ equivalente): Como indica su nombre corresponde al consumo energético por el que pasa la unidad funcional en un determinado proceso.
- Eutrofización (kg P (fósforo) equivalente): En esta categoría se incluyen los impactos debidos a un alto nivel de macronutrientes, nitrógeno y fósforo. Su incremento puede presentar un aumento de la producción de biomasa en ecosistemas de la hidrósfera. Un aumento de las algas en los ecosistemas acuáticos producirá una disminución del contenido de oxígeno debido a que la descomposición de dicha biomasa consumirá como DBO (demanda bioquímica de oxígeno). (Lamana, N. R., & Aja, A. H. (2010), [9])
- Toxicidad humana (1,4 DB (diclorobenceno) equivalente): Corresponde a la capacidad de una sustancia química de producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo, al entrar en contacto con él.
- Agotamiento de la capa de ozono (kg CFC (Clorofluorocarbono) equivalente): La capa de ozono está presente en la estratósfera y actúa como filtro absorbiendo la radiación ultravioleta. La disminución de la capa de ozono provoca un incremento de la cantidad de radiación UV-B que llega a la superficie de la tierra. Dichas radiaciones son causantes de un aumento de algunas enfermedades en humanos, como cáncer, supresión del sistema inmunitario, etc. La mayoría de los cloruros y bromuros, procedentes de compuestos CFCs y otras fuentes, reaccionan en presencia de nubes estratosféricas polares emitiendo cloruros y bromuros activos que bajo la acción catalizadora de los rayos UV provocan la descomposición del ozono. (Lamana, N. R., & Aja, A. H. (2010), [9])
- Material particulado fino ($MP_{2,5}$): Se denomina material particulado fino a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire y que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diezmilésimo de pulgada) o menos de diámetro.

Para la evaluación de los impactos medio ambientales se pueden utilizar los métodos indicados en la Tabla 6.3. Estos métodos calculan en base a un inventario de datos los indicadores medio

ambientales para su posterior análisis. Estos métodos son complementarios, por lo cual no se realiza un análisis de ventajas y desventajas.

Tabla 6.3 Posibles métodos de cálculo de indicadores medio ambientales

Métodos	Indicadores calculados
CML	Acidificación, Cambio Climático, Ecotoxicidad Eutrofización, Toxicidad humana Agotamiento de la capa de ozono
Accumulative energy	Uso de energía
Eco indicator 99	Acidificación, Cambio Climático, Ecotoxicidad Eutrofización, Toxicidad humana Agotamiento de la capa de ozono Material particulado

6.4.4. Selección de metodología para LCA

- Para el caso de la unidad funcional, se puede notar que la más indicada para realizar este estudio corresponde de 100 km a 200 km de recorrido de flota eléctrica, medidos de forma experimental para expresar los resultados. La razón principal por la que se decide escoger esta unidad funcional corresponde a que da una mayor precisión y validación de los resultados. Los cálculos se realizan sobre la base de un bus eléctrico o diésel.
- Para el caso del manejo de datos de ciclo de vida, se decide por una metodología de aprendizaje de máquinas, puesto que se cuenta con suficientes datos experimentales para justificar su uso y esta metodología presenta una mayor precisión y vinculación con la realidad de Montecarlo o uso de datos promedio.
- Con respecto al método de evaluación de impacto, se propone el uso de los tres métodos mostrados en la tabla 6.3.

Con la metodología del análisis de ciclo de vida determinado, se presenta en la siguiente sección el concepto de costo de ciclo de vida.

6.5. Costo de ciclo de vida (LCC)

El Costo del Ciclo de Vida de un activo es, como su nombre lo indica, la cuantificación de la totalidad de los gastos (directos o indirectos, fijos o variables) pagados por este activo a lo largo de su vida útil, como, por ejemplo: investigación y desarrollo, adquisición, construcción, operación y desincorporación. Esta información es muy útil para dar soporte a decisiones técnicas y políticas (basado en un análisis económico) de compra de equipos, optimización y rediseños, programación de mantenimientos y repotenciación o sustitución de un activo y estudios de viabilidad económica.

Los principales ítems considerados para el costo de ciclo de vida son:

- Para el caso de buses eléctricos:
 - Costos de inversión. En los que se incluya todos los costos del vehículo.
 - Costo de la batería: En el que también se incluya en una proyección durante el ciclo de vida del bus, la reposición de batería de acuerdo con las bitácoras de mantenimiento y reposición dados por fábrica.
 - Costo del sistema de carga: Tanto costo de inversión prorrateado por el número de buses que utilizan el sistema como los costos de operación y mantenimiento.
 - Costos de energía suministrada a los buses.
 - Costos de operación y mantenimiento del bus: En base a datos reales de mantenimiento y reposición de repuestos como de bitácoras de mantenimiento, sobre todo para la proyección en la vida útil del bus.
 - Otros costos que no estén especificados anteriormente.
- Para el caso de buses convencionales:
 - Costos de inversión: En los que se incluyan todos los costos del vehículo.
 - Costos del combustible suministrado a los buses.
 - Costos de operación y mantenimiento del bus: En base a datos reales de mantenimiento y reposición de repuestos como de bitácoras de mantenimiento, sobre todo para la proyección en la vida útil del bus.
 - Costo ambiental (emisiones).

En el siguiente capítulo se desarrolla la metodología propuesta.

7. Metodología para realización del estudio

En este capítulo se presenta la metodología implementada para el estudio comparativo de ciclo de vida de buses eléctricos y diésel Euro VI en Chile. En la Figura 7.1 se puede ver un flujograma conceptual de la metodología propuesta para el estudio. En azul se destaca la metodología tradicional de ciclo de vida explicada en la sección 6.

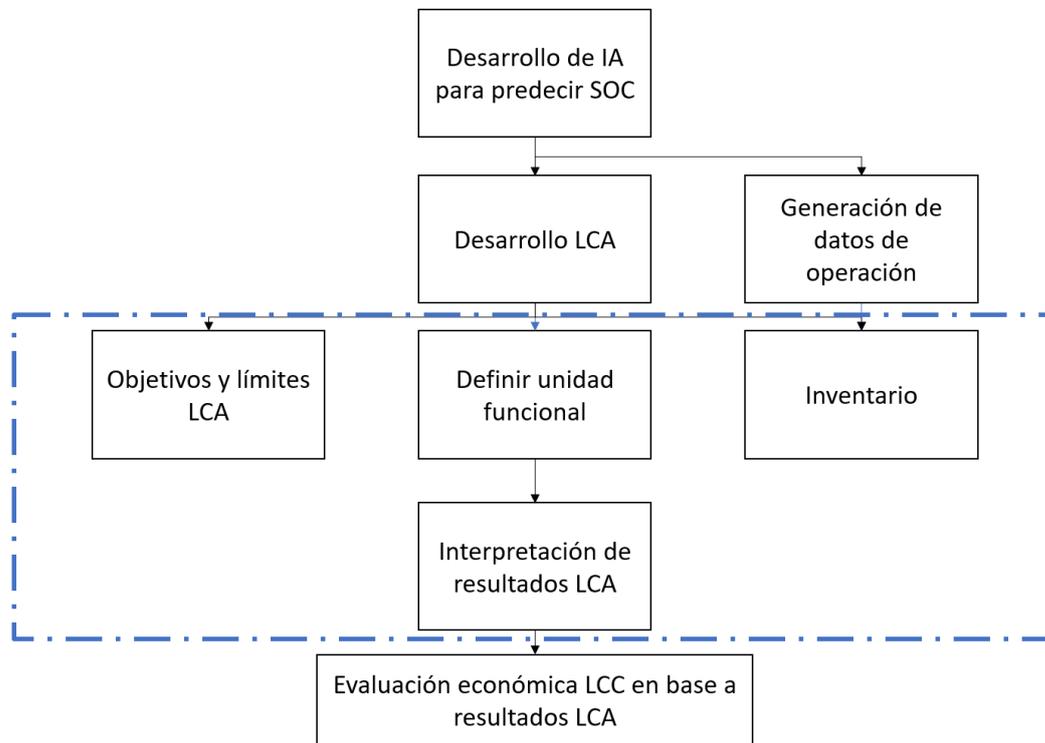


Figura 7.1 Flujograma conceptual de la metodología propuesta. En azul se encuentra marcada la etapa de modelamiento del análisis de ciclo de vida.

A continuación, se desarrollan en detalle las etapas propuestas en esta metodología, poniendo mayor énfasis en las que involucren el uso de inteligencia artificial, las cuales tiene por objetivo construir modelos que permitan predecir el *SOC* en flotas eléctricas para compararlas con flotas Euro VI en Chile.

7.1. Aplicación de algoritmos de IA (Inteligencia Artificial) para predecir *SOC*

El aprendizaje de máquinas es el subcampo de las ciencias de la computación y una rama de la inteligencia artificial, cuyo objetivo es desarrollar y buscar algoritmos y herramientas para generar algoritmos sin la necesidad de escribirlos implícitamente que permitan entender y predecir el comportamiento de una serie de datos. ([18] Skansi, S. (2018)). Para poder entrenar un algoritmo de aprendizaje de máquinas se requieren datos, en la Tabla 7.1 se muestran, los que a criterio de lo indicado en el capítulo 6, son los atributos más útiles para poder entrenar un algoritmo de aprendizaje de máquinas capaz de generar el inventario de datos y de predecir el consumo energético de una flota eléctrica y Euro VI.

Tabla 7.1 Variables para entrenamiento de redes neuronales (NN)

Variables para entrenar NN	Unidad
Marca	Categórica
Peso	kg
Tiempo	s
Distancia	km
Velocidad	km/hr
Conductor	Categórica
Posición GPS	km
Temperatura ambiente	°C
Altura	km
Velocidad del viento	km/hr
Agresividad del pavimento	Adimensional
Características de ruta	Esquema Google Earth
SOC	kJ
Consumo oil	kJ

Una vez obtenidos estos datos se procede a realizar un pre-procesamiento que incluye, análisis para determinar las relaciones entre estas variables y poder reducir la dimensionalidad del problema, evaluación de la calidad de los datos, y elegir el algoritmo más adecuado, sin embargo, según lo revisado en las distintas publicaciones (Zahid, T., Xu, K., Li, W., Li, C., & Li, H. (2018), [24]), el enfoque de aprendizaje de máquinas que presenta mejores resultados para esta tarea corresponde al de redes neuronales.

Tomando como cimiento las redes neuronales se crea primero un algoritmo simple como base para evaluar distintas técnicas para el tratamiento de los datos.

Una vez elegido el tratamiento óptimo y con ello la arquitectura de red apropiada (por ejemplo, convolucional, recurrente, de memoria corta o larga, etc.), se varían los hiper parámetros de la red, es decir, número de épocas, tipo de optimizador, etc. (ver capítulo 9). Con el fin de obtener el mejor modelo con las mejores métricas heurísticas de predicción del SOC. Finalmente se propone variar el resultado de predicción de SOC/km a $SOC/f(km)$ con el fin de determinar qué función aumenta la precisión⁴.

⁴El objetivo principal de esta parte de la metodología es mediante el uso del análisis de sensibilidad, es decir, mediante la variación de un parámetro y las demás constantes, el maximizar el ajuste del algoritmo con los datos, manteniendo la máxima capacidad predictiva posible sin sacrificar generalización. Por último, la función que se hace referencia tiene como objetivo el complementar el trabajo del Centro de Energía en su búsqueda de modelos físicos.

7.2.Desarrollo LCA

El análisis de ciclo de vida o *LCA* es una metodología que permite en este estudio evaluar y comparar los impactos ambientales asociados a las flotas eléctricas y Euro VI. Como se mencionó en la sección 6 consta de 4 fases.

- 1) **Objetivos y límites:** el objetivo del estudio es realizar un análisis comparativo de las flotas eléctricas y Euro VI, cuyos límites son desde la manufactura hasta el fin de la vida útil de los buses.
- 2) **Definir unidad funcional:** La unidad funcional para este estudio está definida en la sección 6.4.4.
- 3) **Inventarios:** El inventario de datos está compuesto por tres medios: datos de bibliografía recopilados principalmente para las fases de manufactura y deposición, datos obtenidos mediante entrevista para la fase de operación y datos obtenidos por medio de los modelos de aprendizaje de máquinas para evaluar el consumo energético de las flotas eléctricas y Euro VI.
- 4) **Interpretación de resultados:** La interpretación de los resultados tiene por objetivo el convertir las categorías de impacto medio ambiental en costos sociales los cuales puedan ser usados para evaluar económicamente las tecnologías de flotas de buses en la red de Santiago.

7.3.Generación de datos a partir de modelos matemáticos-computacionales

Para completar los datos capturados de las flotas eléctricas y Euro VI se propone utilizar los modelos de aprendizaje de máquinas creados para generar nueva información sobre el compartimiento de las flotas eléctricas y Euro VI a lo largo de su vida útil. Esta metodología presenta la ventaja de representar de mejor forma la realidad de los datos observados. Con estos modelos se alimenta el *LCA* con el fin de obtener las categorías de impacto para cada una de las rutas seleccionadas para todo el ciclo de vida de una flota eléctrica. Los pasos requeridos en el *LCA* son:

- Definir cuál es la vida útil de una flota eléctrica y Euro VI.
- Definir la unidad funcional.
- Definir el objetivo del estudio y los alcances.
- Modelar y obtener las categorías de impacto.

Con respecto a la vida útil de las flotas, estos datos serán recopilados de la información del fabricante, la garantía (10 años aproximadamente, que tienen por contrato las empresas) y datos de degradación de los buses. Se realizará un análisis de sensibilidad que contemple varios escenarios de degradación.

Con respecto al objetivo del estudio de *LCA*, este ya se encuentra definido según el TDR y lo expuesto en los objetivos, y es la evaluación y comparación del impacto medio ambiental de la flota eléctrica y Euro VI a lo largo de toda su vida útil, vale decir, desde que se extraen los materiales para confeccionar los elementos constitutivos de estos buses, hasta su reciclaje y/o reutilización parcial

o total, ha este tipo de LCA se le conoce como “desde la cuna a la muerte”. La Figura 7.2 presenta la primera versión para este estudio.

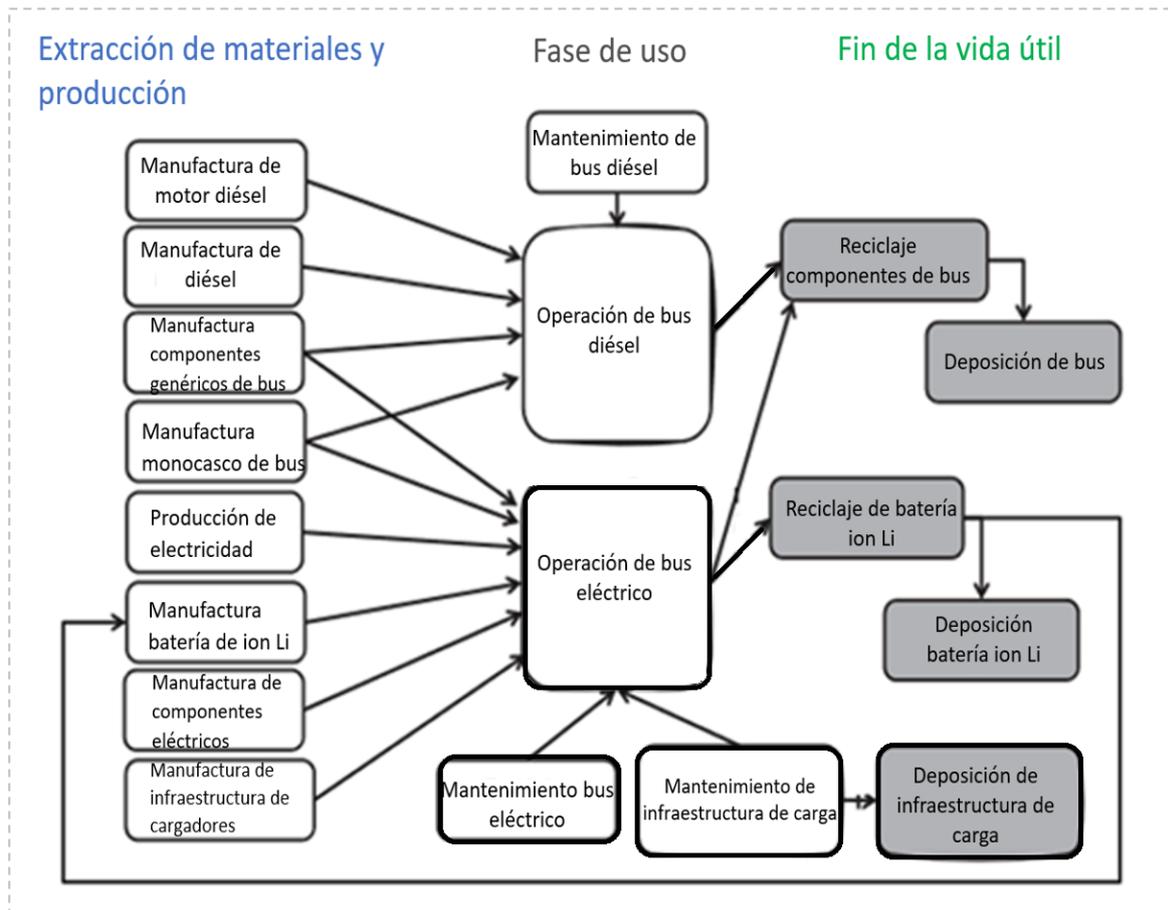


Figura 7.2 Límites del análisis de ciclo de vida.

7.4. Aplicación metodológica tradicional

Se consideran los objetivos y límites del LCA acorde a la figura 7.2 y el inventario de datos generado en base a lo expuesto en 8.3. Esta información, junto al desarrollo de la IA alimentan al bloque tradicional de LCA, en el cual se define la unidad funcional con la cual se procede a cuantificar, mediante la base de datos de ecoinvent 2.2 e Idemat (Del Duce, A., Gauch, M., & Althaus, H. J. (2016), [25]), las cargas ambientales. Estas cargas ambientales se estiman para cada uno de los procesos de su ciclo de vida y son llevadas a costos ecológicos. Los costos ecológicos son los costos de la carga ambiental de un producto sobre la base de la prevención de esa carga, quiere decir, son los costos en que se debe incurrir para reducir la contaminación ambiental y el agotamiento de materiales a un nivel que esté en línea con la capacidad de carga del planeta. Siguiendo con la metodología tradicional, y una vez obtenidos los resultados del LCA como costos se procede a la interpretación de resultados y posterior evaluación económica.

7.5. Evaluación económica

Con los resultados del análisis de ciclo de vida se cuantifican los costos asociados a la disminución de gases de efecto invernadero y material particulado. Mediante el algoritmo generado en la fase de inteligencia artificial se procederá a evaluar distintas rutas para flotas eléctricas comparándolas con flotas Euro VI, con el fin de encontrar las mejores alternativas para la inclusión de esta nueva tecnología. Con el resultado anterior se procede a realizar un análisis de costo de ciclo de vida con un enfoque social con una tasa de descuento del 6%⁵. Para ello con anterioridad se procede mediante entrevistas a los operadores de flotas eléctricas y Euro VI diésel, a recabar la información necesario, como: costos de inversión, en los que se incluya todos los costos del vehículo puesto en Chile separados del costo de la batería.

- Costo de la batería: En el que también se incluya en una proyección durante el ciclo de vida del bus, la reposición de batería de acuerdo con las bitácoras de mantenimiento y reposición dados por fábrica.
- Costo del sistema de carga: Tanto costo de inversión prorrateado por el número de buses que utilizan el sistema como los costos de operación y mantenimiento.
- Costos de energía suministrada a los buses.
- Costos de operación y mantenimiento del bus: En base a datos reales de mantenimiento y reposición de repuestos como de bitácoras de mantenimiento, sobre todo para la proyección en la vida útil del bus.

El costo de operación del bus está dividido en tres grandes aristas en este estudio:

- Costo de operación
- Costo de mantenimiento
- Costo de calidad del aire y ambiental

Con los resultados económicos obtenidos se pretende generar como principal entregable la curva *TCO* (costo total de propiedad) la cual posee un interés fundamental para desarrollar políticas públicas. En las siguientes secciones se desarrollarán los modelos de LCA y LCC para poder realizar la comparación de las tecnologías de buses eléctricos y diésel.

⁵ El dinero futuro vale menos que el dinero presente, puesto que de tenerlo ahora se puede invertir y generar ganancias. Además, con el tiempo, el costo de la vida aumenta, lo que se conoce como inflación. Por tanto, para poder analizar un proyecto financiero a lo largo del tiempo se requiere tomar el dinero futuro y llevarlo al presente penalizándolo. Esta penalización se le conoce como costo de oportunidad y se le representa como la tasa de descuento. Según la ley en Chile, todo proyecto de carácter social, vale decir, cuyo enfoque es ayudar a la comunidad, debe ser evaluado con una tasa de descuento del 6%. Pese a lo anterior, es de buena práctica el variar este parámetro, lo que se le conoce como análisis de sensibilidad.

8. Modelo conceptual de LCA y LCC de flotas eléctricas

En esta sección se aplica la conceptualización de la metodología propuesta en la sección 7 a flotas eléctricas y Euro VI, definiendo primeramente los distintos procesos por los que pasan las flotas eléctricas y diésel a lo largo de su ciclo de vida para la definición de objetivo y alcance de LCA y LCC. Se exponen los diagramas de LCA y LCC, así como los modelos de costos para buses eléctricos y diésel. Con esta información se definen las unidades funcionales para la generación de inventario de datos de la metodología, esto es, las variables que se utilizan en el modelo.

8.1. Diagrama LCA buses eléctricos

El diagrama que se puede ver en la Figura 8.1 muestra el desarrollo conceptual del análisis de ciclo de vida para buses eléctricos, el cual está dividido en tres bloques principales: manufactura, operación y fin de la vida útil. La línea punteada indica los límites del ciclo de vida del estudio.

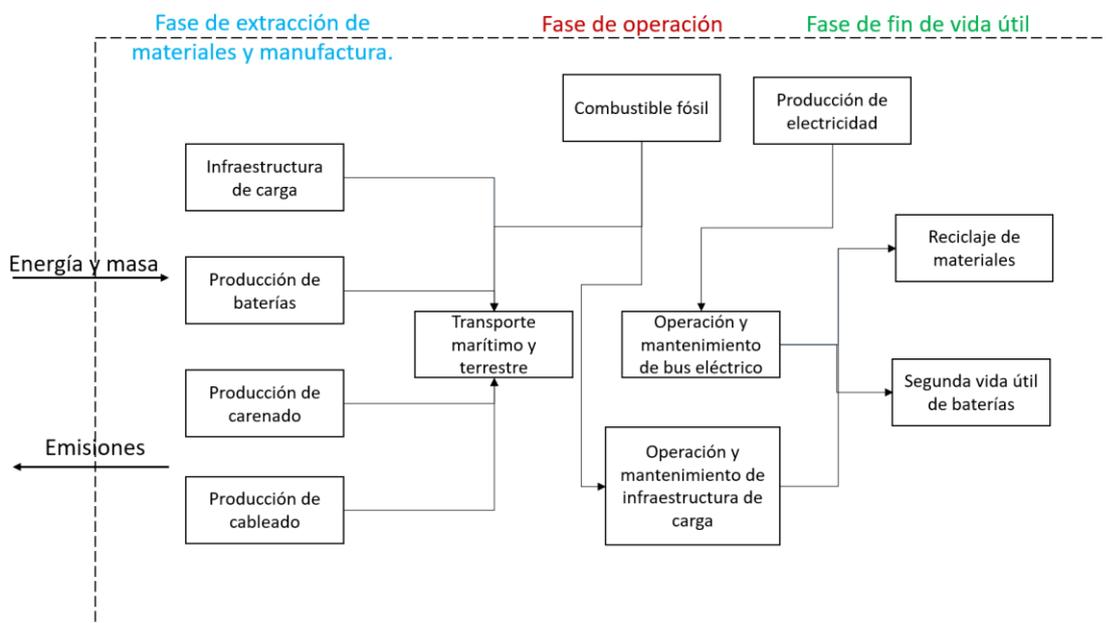


Figura 8.1 Desarrollo conceptual de LCA para buses eléctricos.

Con respecto a la manufactura del bus eléctrico, este consta de cuatro procesos: producción de infraestructura de carga, baterías, carenado y cableado, cada uno de estos procesos comienza con la extracción de materias primas las cuales deben ser procesadas. En (Helmers, E., Dietz, J., & Weiss, M. (2020), [13]) se presenta un completo inventario de los componentes de un vehículo eléctrico. Aunque su enfoque está centrado sobre los vehículos livianos, sus resultados son escalables a los buses eléctricos.

Con respecto a la fase de uso, está compuesta por dos procesos, el uso propiamente tal, en el cual el bus tendrá ciclos de carga y descarga de las baterías que producirán una degradación del activo a lo largo del tiempo y por otro lado el mantenimiento. Los datos de esta etapa son experimentales y se recopilan mediante entrevistas.

Con respecto a la última fase que corresponde al fin de la vida útil de los activos, para las baterías se propone una segunda vida útil, considerando distintos escenarios de degradación como se puede ver en (Casals, L. C., García, B. A., Aguesse, F., & Iturrondobeitia, A. (2017), [14]). Por otro lado, a los demás componentes se les da un tratamiento más general y se considera solo su proceso de reciclaje en su conjunto, la razón detrás de esta decisión es que en la actualidad las baterías de ion-litio son los elementos más costosos tanto desde el punto de vista económico como ambiental de producir por lo que ameritan un estudio más profundo.

8.2. Diagrama LCA buses diésel

En el diagrama que se puede ver en la Figura 8.2 se muestra el desarrollo conceptual del análisis de ciclo de vida para buses propulsados mediante combustible diésel, en particular de la generación Euro VI. La línea punteada indica los límites del ciclo de vida del estudio.

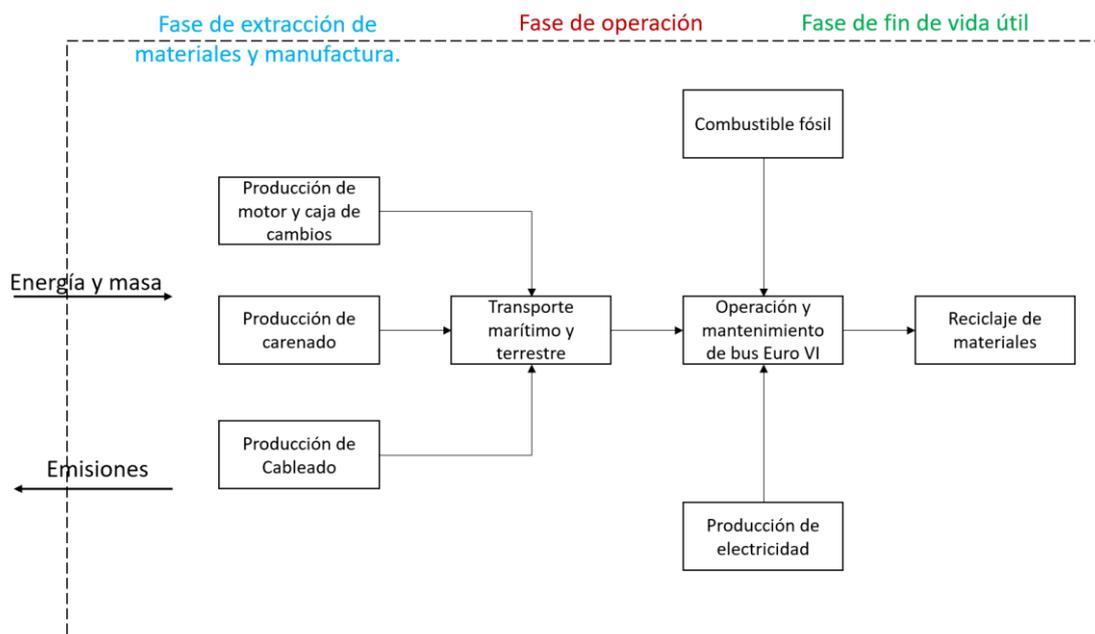


Figura 8.2 Desarrollo conceptual de LCA para buses diésel.

Con respecto al proceso de fabricación del bus diésel, este es muy similar al del bus eléctrico, salvo por su unidad de potencia, en (Nordelöf, A., Romare, M., & Tivander, J. (2019), [15]) se muestran los resultados de LCA para buses de la generación Euro VI. Con respecto a la fase de uso, mediante la recopilación experimental se tendrá la energía consumida. Por último, con respecto a la fase de fin de la vida útil, dado que esta tecnología está más asentada, será más sencillo el recopilar esta información mediante entrevistas a los operadores.

8.3. Modelo de costo de ciclo de vida (LCC) para buses eléctricos

Con respecto a los buses eléctricos, su modelo de costo de ciclo de vida consta de las fases de compra, traslado, uso, mantención y fin de la vida útil, la razón detrás de esta decisión se debe a que no existe información de los costos de producción de los buses eléctricos, principalmente porque esta información se considera confidencial por ser parte de la estrategia de negocios de las compañías fabricantes (Bi, Z., De Kleine, R., & Keoleian, G. A. (2017), [16]). A continuación, se presenta el modelo propuesto para LCC en buses eléctricos.

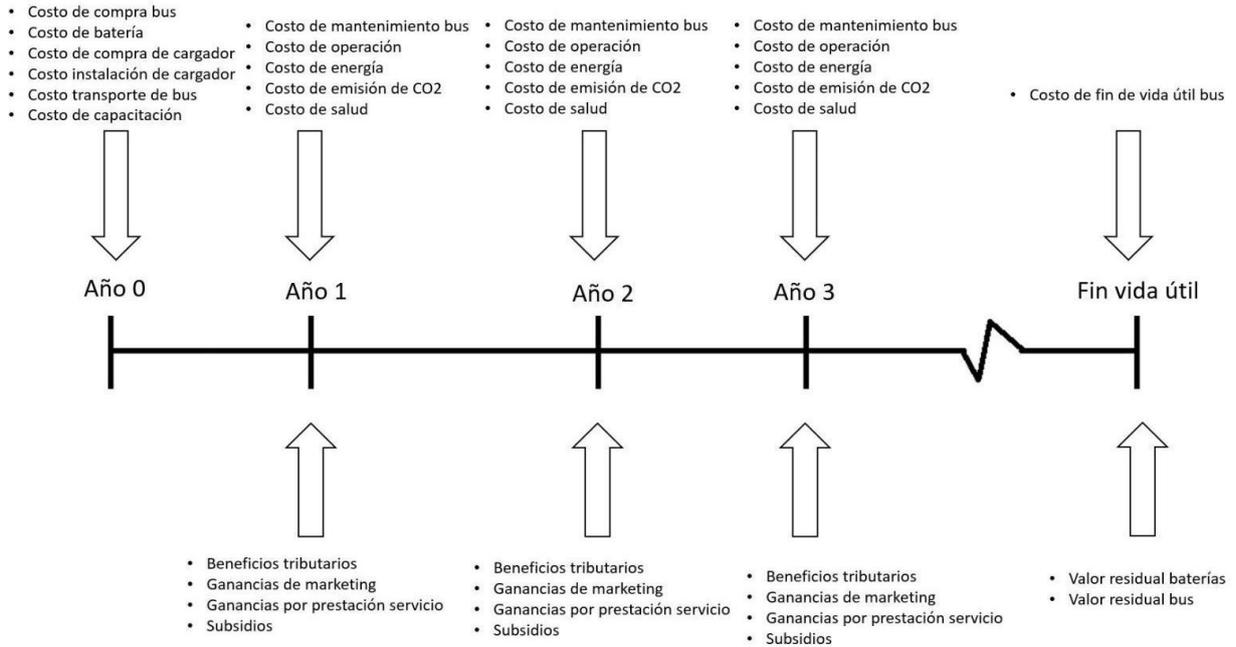


Figura 8.3 Diagrama de flujo de gastos LCC buses eléctricos.

8.4. Modelo de costo de ciclo de vida (LCC) para buses diésel

Con respecto a los buses diésel su modelo de costo de ciclo de vida es análogo al anterior de los buses eléctricos, consta de las fases de compra, traslado, uso, mantención y fin de la vida útil, al igual que en el modelo para buses eléctricos, la etapa de manufactura no se considera al haber muy poca información de los fabricantes, así mismo, para que los resultados descubiertos por estas metodologías sean comparables (Potkány, M., Hlatká, M., Debnár, M., & Hanzl, J. (2018), [17]). A continuación, se presenta el modelo propuesto para LCC en buses eléctricos.

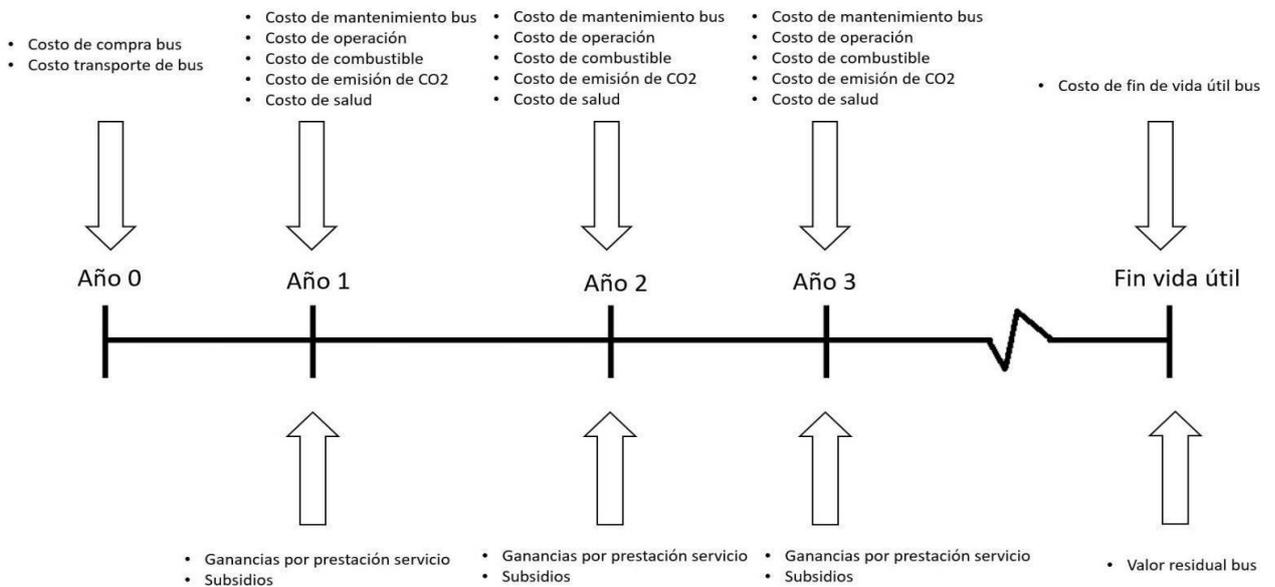


Figura 8.4 Diagrama de flujo de gastos LCC buses diésel.

8.5. Variables consideradas en el modelo

En esta subsección se presentan las variables consideradas en el estudio de análisis de costos de ciclo de vida de forma desagregada con sus respectivas unidades, con el propósito de presentar la base monetaria y temporal en la que se realiza el estudio. La siguiente tabla 8.1 muestra las variables consideradas para el estudio LCC comparativo entre flota eléctrica y Euro VI.

Tabla 8.1 Variables LCC

Nombre de la Variable	Unidad
Tiempo de vida	Años
Tasa de descuento	%
Costo compra bus	USD
Costo compra baterías	UDS
Costo de compra instalación de carga	USD
Costo de compra cargadores	USD
Costos de capacitación.	USD
Degradación. $D(t)$	%
Costo de la energía	USD/kWh
Costo diésel	USD/L
Salarios	USD/año
Depreciación.	%
Seguros	USD/año
Flujo de pasajeros	N° personas/año
Impuestos	%
Costo de mantenimiento contrato	USD/año
Ganancia por pasajero.	USD/persona
Rendimiento.	kWh/km%
Distancia recorrida.	km/año
Costos de repuestos	USD/año
Otros gastos de operación.	USD/año
Emisiones de CO_2	Toneladas CO_2 /Años
Emisiones de $PM_{2.5}$	Toneladas $PM_{2.5}$ /año
Costo ambiental	USD/Tonelada CO_2
Costo de salud.	USD/Tonelada $PM_{2.5}$
Valor residual baterías.	USD
Valor residual bus.	USD
Beneficios tributarios.	%
Beneficios del marketing.	USD/año
Subsidios.	USD/año

9. Pronósticos a corto plazo para el SOC

En esta sección se presenta una descripción de la tarea de pronóstico del SOC y el modelo matemático-computacional resultante. Primero, se presenta un resumen de la matemática involucrada en el aprendizaje automático y modelos de pronóstico basados en redes neuronales, así como el proceso de entrenamiento de las redes. Luego, se expone el pre-procesamiento de los datos para el desarrollo y uso de modelos de aprendizaje de máquinas. Finalmente se presenta un ejemplo de resultado obtenido con el modelo desarrollado.

9.1. Aprendizaje automático y modelos de pronóstico basados en redes neuronales

El concepto de redes neuronales se inspira ligeramente en cómo funcionan las conexiones neurológicas humanas. Una señal se transmite a través de una red y activará respuestas relacionadas con la naturaleza de la señal y el propósito del sensor. Por lo tanto, como modelo paramétrico, el proceso de aprendizaje puede entenderse como un ajuste de los parámetros de la red para expresar una señal de salida basada en una señal de entrada.

Como se muestra en la Figura 9.1, esto puede representarse mediante una capa de entrada, varias capas ocultas y una capa de salida final. Cada capa está compuesta por un conjunto de unidades ocultas o neuronas conectadas por pesos y sesgos. En cada unidad se realizan las siguientes operaciones:

$$y = \sigma(w^T X + b) \quad (9.1)$$

En la ecuación (9.1), un vector de entrada X se multiplica por una matriz de pesos w (cada uno representa una neurona) y luego se agrega a un sesgo b (común para cada capa). Finalmente, se aplica una operación no lineal para obtener la salida y , dependiendo de la tarea seleccionada. Esta operación se repite hasta que se alcanza la salida final en la capa de salida. Para las tareas de clasificación, el número de unidades de salida es igual al número de clases presentes en los datos. Para las tareas de regresión, sólo hay una salida: los datos futuros de la serie.

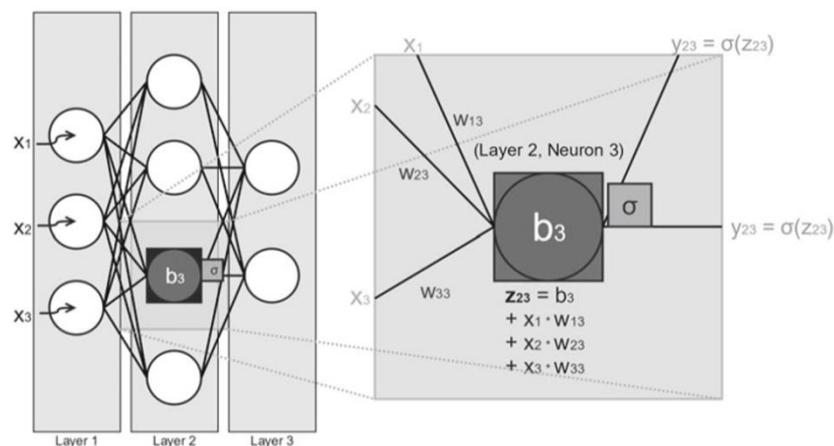


Figura 9.1: Estructura básica de las redes neuronales. (Skansi, S. (2018) [18])

9.1.1. Métricas para el problema de regresión

Para los problemas de regresión, el error cuadrático medio (MSE) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) son métricas frecuentes que se utilizan para evaluar la precisión de n valores pronosticados. La minimización es directa y el RMSE tiende a penalizar aún más la diferencia entre los valores reales y_{real} y los pronosticados y_{pred} que el MSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{real} - y_{pred})^2}{n}} \quad (9.2)$$

Ahora, ¿qué pasa si el MSE para las predicciones es 32? ¿Se debe mejorar el modelo o es lo suficientemente bueno? ¿O si el MSE era 0.4? En realidad, es difícil darse cuenta si el modelo es bueno o no al observar los valores absolutos de MSE o RMSE.

El coeficiente de determinación, o R^2 (a veces leído como R-dos), es otra medida que se puede utilizar para evaluar un modelo y está estrechamente relacionada con la MSE, pero tiene la ventaja de estar libre de escala, no importa si los valores de salida son muy grandes o pequeños, el R^2 siempre estará entre $-\infty$ y 1. En donde 1 significa un modelo que se ajusta de forma perfecta a los datos.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{pred} - \underline{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{real} - \underline{y})^2} \quad (9.3)$$

Este coeficiente se usa principalmente para medir la precisión con la que modelos tanto físicos, como matemáticos-computacionales son capaces de realizar predicciones.

9.1.2. Proceso de entrenamiento

Durante el desarrollo de diferentes arquitecturas y pruebas de modelos, se utilizan varios procesos de entrenamiento. Con respecto a las tareas supervisadas, se puede decir lo siguiente: el objetivo es optimizar una función de costo o pérdida que compara los valores pronosticados con las etiquetas reales de los datos. Para las tareas de regresión, existen diferentes enfoques con respecto a las funciones de pérdida, funciones de activación, métricas y estructuras de evaluación.

En la actualidad un algoritmo llamado retro propagación, que es una aplicación de la Regla Delta (Goodfellow et al (2016), [19]), es un método de uso frecuente para entrenar redes neuronales profundas. La retro propagación es un método para calcular gradientes con los que los pesos y los sesgos se actualizan durante el entrenamiento por la regla de la cadena. Esto significa que cuando los pesos y los sesgos se inician aleatoriamente, se realiza un primer paso directo a través de la red

y se calcula la salida. Luego, el valor de la función de error o costo se pasa hacia atrás a la red, ajustando los pesos y sesgos. Luego, el siguiente paso hacia adelante arrojará un resultado diferente y, posteriormente, mediante retro propagación del error, los parámetros se actualizarán nuevamente. El método preciso con el que se actualizan los pesos y los sesgos depende del optimizador utilizado, la tasa de aprendizaje η y cómo estos usan variaciones de descenso de gradiente estocástico⁶ para converger a un mínimo local. La existencia de un mínimo global no está garantizada, ya que este no es un problema convexo. Por lo tanto, el proceso de entrenamiento tiene el riesgo de guiar la solución a mínimos locales desfavorables, como se muestra en la Figura 9.2. La ecuación (9.4) representa la ecuación del algoritmo de retro propagación.

$$\Delta w_{ij}^{t+1} = \eta(t_j - y_j)x_i \quad (9.4)$$

Los conjuntos de datos se dividen en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. Los parámetros del modelo se ajustan a los datos de entrenamiento, adicionalmente el rendimiento durante el proceso de entrenamiento se puede evaluar con un conjunto de validación. Finalmente, cuando se completa el proceso de entrenamiento, el rendimiento general de la red se evalúa con los datos de la prueba. Una división de datos habitual es del 20% de datos de prueba y 80% de datos de entrenamiento, mientras que un conjunto de validación de 10-15% también se puede extraer del conjunto de entrenamiento. Es importante mantener la independencia entre estos conjuntos y entre las características del conjunto de datos. Si un sensor no varía durante el intervalo de tiempo estudiado o si se usó para calcular otra variable, estos valores deben descartarse.

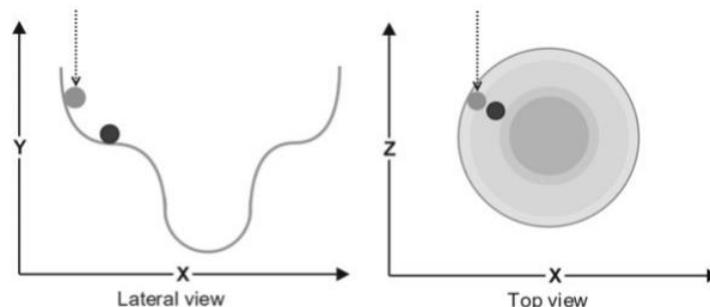


Figura 9.2: Mínimo local. (Skansi, S. (2018) [18])

- *Overfitting*, *Underfitting* y Regularización

El *overfitting* de un modelo da como resultado un rendimiento más bajo cuando se enfrenta a datos fuera del conjunto de entrenamiento. Esto significa que los parámetros se han ajustado demasiado bien a los datos de entrenamiento y han perdido su capacidad de generalizar las condiciones. Esto puede deberse a una estructura muy compleja de la red entrenada (alto número de parámetros) en comparación con un conjunto de datos de entrenamiento pequeño o ruidoso que no es representativo de los fenómenos estudiados. *Underfitting* por otro lado, da como resultado un bajo rendimiento debido a la incapacidad del modelo para capturar la estructura de los datos. Esto sucede al realizar modelos muy simples (muy pocos parámetros).

Para evitar estos fenómenos, se utilizan varias técnicas de regularización. El *drop out*, la penalización, la normalización de lotes y la validación cruzada se pueden usar para identificar y

⁶El descenso del gradiente estocástico es un método iterativo para la optimización de una función objetivo diferenciable.

prevenir el *overfitting*. Cada técnica tiene su propio conjunto de parámetros internos y valores de uso frecuente que se pueden encontrar fácilmente en investigaciones publicadas.

- Hiperparámetros.

La arquitectura de la red está definida por un conjunto de hiper parámetros. Se presenta una breve lista de conceptos básicos:

- 1) Número de capas: Dependiendo de las relaciones dentro de los datos analizados, una red más profunda puede permitir el mapeo de funciones más complejas, ya que cada capa podrá extraer diferentes características de los datos originales.
- 2) Número de unidades: para cada capa, se debe seleccionar el número de unidades. Las arquitecturas más profundas con un número menor de unidades por capa generalmente se prefieren a las capas anchas y poco profundas, para permitir una comprensión más compleja de los datos.
- 3) Probabilidad de *drop out*: El *drop out* puede usarse como una técnica de regularización, con la probabilidad de abandonar una unidad de $[0,1]$. Esta aleatoriedad inherente permite que la red entrene sin depender de pesos específicos. La deserción también se puede utilizar para estudiar la incertidumbre de las predicciones del modelo. Ver Figura 9.3.
- 4) Función de activación: cada capa oculta tiene una función de activación σ . Estas son funciones no lineales como Sigmoid (5), Tanh (6), ReLU (7) o Leaky ReLU (8), entre otras. Estas se muestran en las siguientes ecuaciones y en la Figura 9.4. Cada tipo tiene sus propias fortalezas y debilidades dependiendo del tipo de datos analizados. Una característica importante para seleccionar la función de activación es su derivada, ya que es crítica para la propagación hacia atrás. Los gradientes que desaparecen o explotan son susceptibles en redes profundas y se pueden tomar medidas adicionales para hacer que el proceso de aprendizaje sea más fluido, como usar diferentes tasas de aprendizaje por capa o usar procesos de inicialización específicos.

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (9.5)$$

$$\text{Tanh}(x) = \frac{e^x + 1}{e^x - 1} \quad (9.6)$$

$$\text{ReLU} = \{0 \text{ for } x < 0, x \text{ for } x \geq 0\} \quad (9.7)$$

$$\text{Leaky ReLU} = \{ax \text{ for } x < 0, x \text{ for } x \geq 0\} \quad (9.8)$$

- 5) Optimizar: el optimizador seleccionado define el método mediante el cual los pesos y sesgos de la red se actualizan a través de la retro propagación. Existen varias técnicas, responsables de la minimización de la función objetivo a través del descenso de gradientes, como SGD, o

mediante métodos de optimización de momento como Nesterov y Adagrad. Los métodos adaptativos, como Adam y RMSProp, obtienen resultados más estables que otras técnicas de optimización al incluir la decadencia exponencial en sus operaciones.

- 6) Número de épocas: una época se define como un paso completo, hacia adelante y hacia atrás, de todos los lotes del conjunto de datos a través de la red. El rendimiento de los modelos depende de cuántas épocas de entrenamiento alcance. El optimizador y la tasa de aprendizaje, así como el error de entrenamiento y validación se utilizan para diagnosticar la cantidad de épocas requeridas para que el modelo converja.

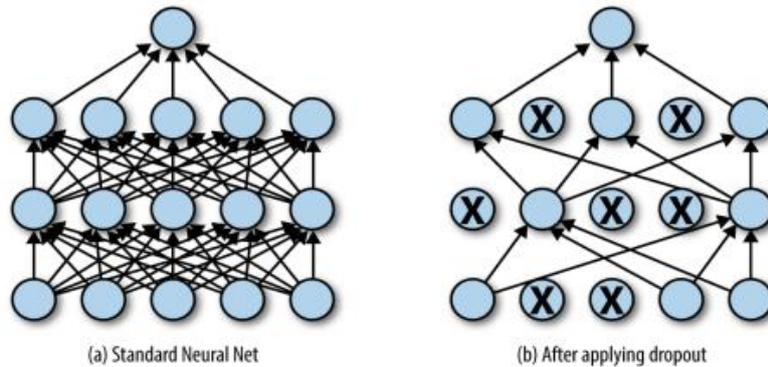


Figura9.3: Drop out. (Aggarwal, C. C. (2018). [20])

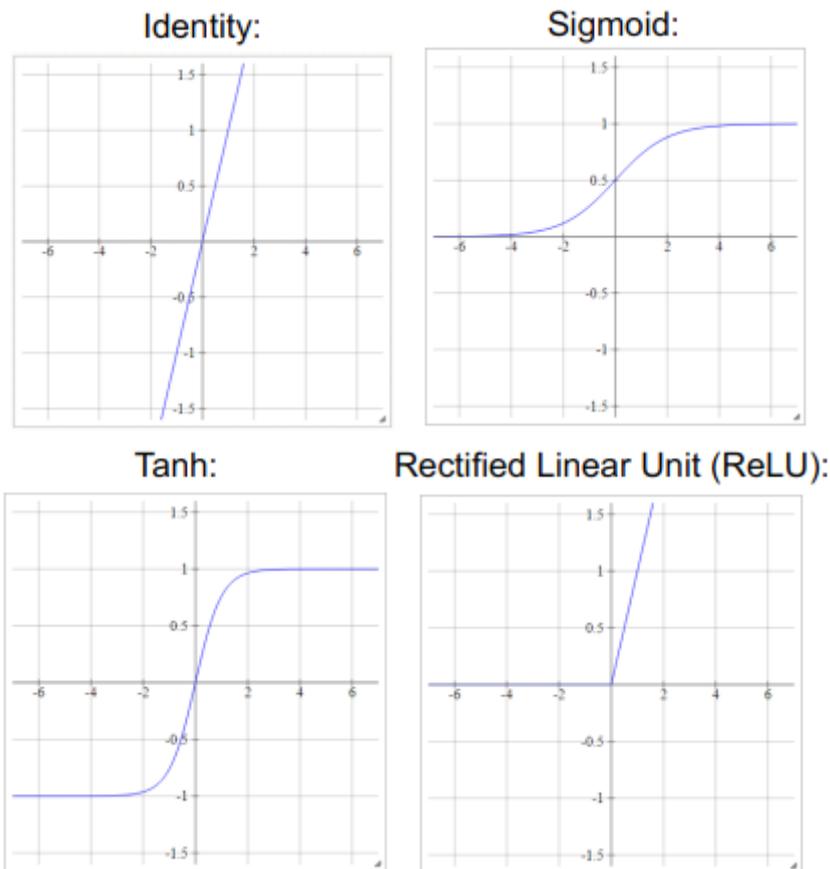


Figura 9.4: Principales funciones de activación (Goodfellow et al (2016), [19])

El número de hiper parámetros implica un proceso complejo de ajuste de cada uno de estos valores, además de las relaciones y el efecto que cada hiper parámetro tiene sobre los demás y el rendimiento general del modelo para datos de entrada específicos. A través de prueba y error, se pueden lograr resultados aceptables.

9.2. Procesamiento de los datos y consideraciones

Los datos operacionales de buses eléctricos y Euro VI entregados por los operadores están en formato .csv y en términos generales están “crudos”, es decir, no es posible sacarle valor científico o comercial. Por lo que una serie de técnicas fueron utilizadas para poder depurar los archivos. Estos procedimientos fueron automatizados en el algoritmo pre_proceso.ipynb escrito en el lenguaje Python 3.

En primer lugar, al leer un archivo .csv se podrá notar que los sensores miden 174 variables. En la Figura 9.5 se puede ver marcado en verde la variable “Device Time”. Al analizarla se puede constatar que se han realizado múltiples pruebas en diferentes días y que no han sido propiamente separados. Para resolver esto se copia la columna “Device Time” la cual tiene una estructura de: dd-mm-aaaahh:mm:ss:msms. Ha esta nueva columna se le conserva los datos dd-mm-aaaa y los demás son descartados. Por lo que tenemos el día, mes y año en el que se tomaron los datos. Al descartar la información repetida de esta última columna, tenemos la cantidad de días, y con ella se pivotan las demás variables de la tabla, extrayendo sub-tablas por día de prueba, las cuales son guardadas en un tensor (matriz de tres dimensiones).

```
[ ] train_df.tail(5)
```

	003_VMCU Real Vehicle Speed(km/h)	004_CALC Average Battery Temperature(°C)	004_CALC Average Cell Voltage(V)	004_CALC Estimated time 45kw 80% Charge(minutes)	Altitude	Bea- ring	Device Time	G(calibrated)	G(x)	G(y)	G(z)	(Meter)
	0.0	32.083332	4.03125	0.0	714.084961	0.0	20-Jan-2020 11:55:16.975	NaN	NaN	NaN	NaN	
	0.0	32.083332	4.03125	0.0	705.650146	0.0	20-Jan-2020 11:55:21.974	NaN	NaN	NaN	NaN	

Figura 9.5: Ejemplo de tabla de datos sin procesar.

Con los datos separados por día, se toma un subconjunto de variables apropiadas para predecir el estado de carga. Para esta tarea la física nos indica que el estado de carga es la integral de la potencia, por lo que la velocidad, la altura y la temperatura se eligen como variables, como mejora futura se puede utilizar métodos de PCA (Análisis de componentes principales) para mejorar este criterio. Al observar estas variables, se puede ver que muchos datos tienen NaN (*Not a Number*), Figura 9.5 en rojo. Por lo que se eliminaron todas las trayectorias que no estuviesen completas.

Posteriormente, los datos fueron transformados de formato cadena a flotante, es decir a número real. Al graficar algunas trayectorias, se observa la presencia de *outliers* como se puede ver en la Figura 9.6.

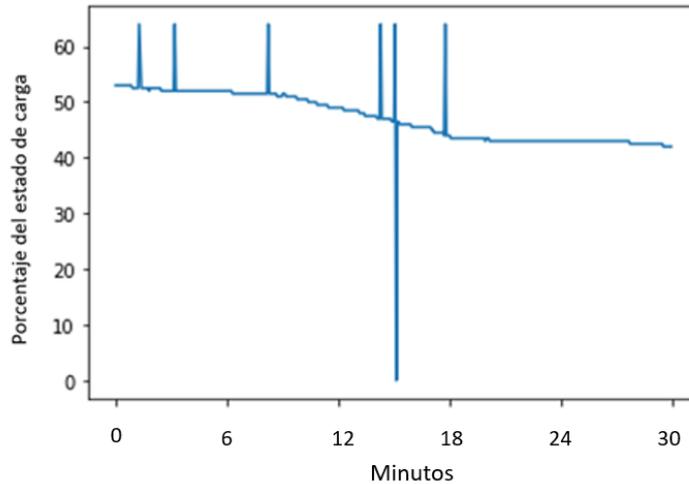


Figura 9.6 Estado de carga vs paso temporal sin pre-procesamiento.

Los *outliers* son valores atípicos que se deben a errores en los procesos de medición, como, por ejemplo, cuando se apaga un sensor. Para identificarlos se utilizó una ventana Hampel⁷. La Figura 9.7 muestra los mismos datos de estado de carga de la Figura 9.6 después que le fueran identificados los *outliers* y reemplazados por datos generados aleatoriamente desde una distribución envolvente de largo 15 (7 valores a la izquierda, 7 a la derecha y uno al centro).

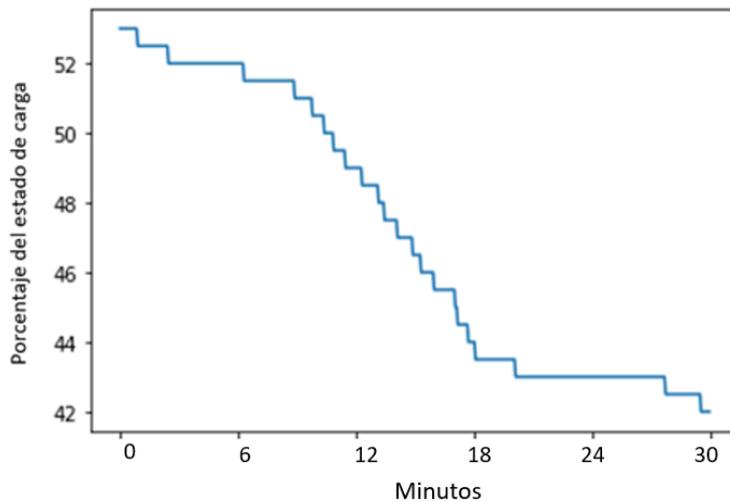


Figura 9.7 Estado de carga vs paso temporal procesados.

⁷ La ventana de Hampel corresponde a un filtro que se utiliza en análisis exploratorio de datos para eliminar valores atípicos de una secuencia temporal.

9.3.Resultados de pronóstico del SOC

Una vez terminado el pre-procesamiento y limpiado los datos como se puede ver en la Figura 9.7, se procedió a entrenar el algoritmo. El modelo desarrollado consiste en una red neuronal densa la cual posee 3 capas, una capa de normalización y una capa de *drop out*, la cual fue entrenada durante 500 épocas. Las Figuras 9.8 y 9.9 muestran el error cuadrático medio y el coeficiente R² a lo largo del entrenamiento.

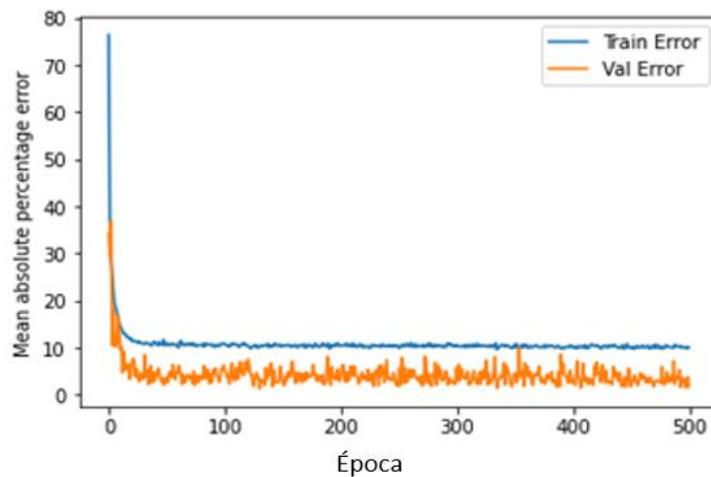


Figura 9.8: Error cuadrático medio a lo largo del entrenamiento.

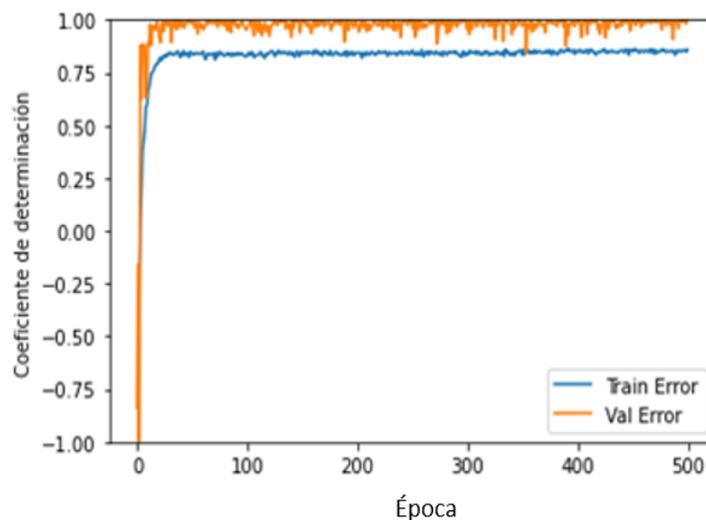


Figura 9.9: Coeficiente R² medio a lo largo del entrenamiento.

Terminado el entrenamiento de la red, se procedió a medir su eficacia en la predicción del estado de carga. Al probar usando los datos de prueba (datos que no ha visto nunca la red), se obtuvo una precisión del 99.7%. La Figura 9.10 muestra la efectividad con la que la red predice el estado de carga de un bus eléctrico, se puede notar que la nube de puntos se asemeja a la identidad, es decir los valores predichos son muy cercanos, o casi iguales, a los valores verdaderos, lo cual en una función identidad que se entiende como $F(X)=X$, equivale a una precisión del 100%. Por último, se

aisló una ventana de aproximadamente 35 minutos de conducción (400 pasos de tiempo) y se le pidió a la red que calculase la serie temporal de estado de carga en el tiempo, el resultado se puede ver en la Figura 9.11 en donde la curva real y predicha son muy cercanas.

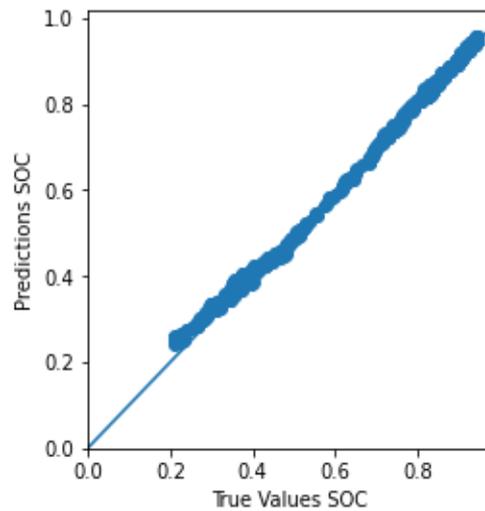


Figura 9.10: Eje X valores medidos, eje Y valores predichos por el algoritmo.

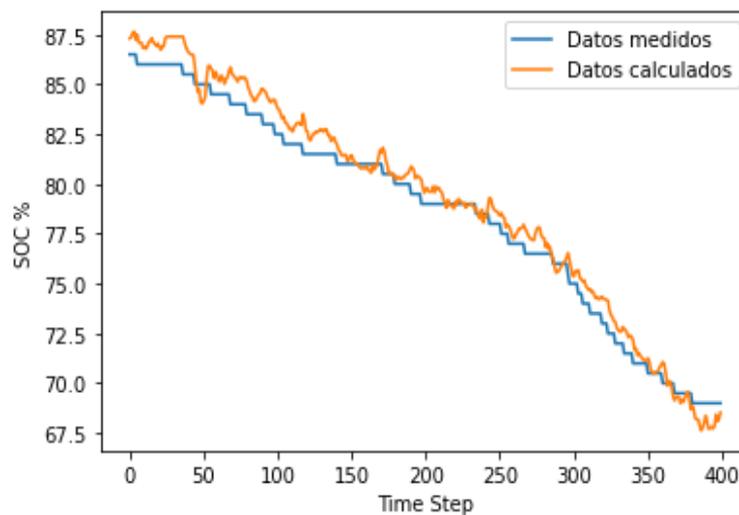


Figura 9.11: Predicción del estado de carga en el tiempo vs mediciones tomadas.

Con base en lo expuesto, se puede concluir que se ha tenido éxito en generar un algoritmo de pronóstico del estado de carga de un bus eléctrico. Esta herramienta está validada para predecir el estado de carga (y con ello el consumo) de flotas eléctricas en Santiago de Chile y cuenta con una precisión del 99%.

10. Costes de buses eléctricos y EURO VI, y comparación entre ambas tecnologías

El propósito de este capítulo es resumir la información de costos de buses eléctricos y EURO VI levantada durante este estudio como parte de la fase de inventario del LCA. Esta información fue obtenida mediante entrevistas a los operadores de buses de flotas eléctricas de la Región Metropolitana de Chile (anexo A). La información se presenta en formato de tablas y está dividida según las fases del ciclo de vida del bus eléctrico o diésel. Desde el punto de vista financiero, es decir, compra, uso, mantención y fin de la vida útil, el traslado (marítimo y terrestre) no se considera en este estudio puesto que la variación entre las tecnologías no es significativa para tenerla en cuenta, ya que corresponde a aproximadamente al 0.0004% del ciclo de vida⁸, (McKenzie, E. C., & Durango-Cohen, P. L. (2012), [33]).

10.1. Definiciones de los costos involucrados

El propósito de esta sección es definir los costos que se están considerando en este modelo. Como se puede ver en la tabla 10.1 se tienen definidos los parámetros generales del modelo de LCC, los cuales se pueden dividir de forma pedagógica en 3 fases. La primera es la fase de compra, que como su nombre lo indica, corresponde a la compra del activo principal (el bus eléctrico o diésel) y los complementos necesarios para operarlo. En esta fase separamos el costo del bus eléctrico y del banco de baterías, pues el costo del banco de baterías es dominante en el costo total del bus eléctrico, por lo que rastrear su predicción en el tiempo nos puede dar información sobre los costos futuros de la tecnología (Narins, T. P. (2017), [34]).

Con respecto a la segunda fase que corresponde a la operación, se distinguen 3 clases de costos, los costos derivados de la operación, que corresponden al costo de la energía empleada para poder operar los buses, los costos de mantención, y los costos ambientales y de salud. Estos dos últimos provienen del LCA y se miden en dióxido de carbono y material particulado fino, los cuales se pueden valorizar monetariamente mediante los eco costos que se introducen al final del capítulo 11.

Finalmente, con respecto a la fase de fin de vida útil esta está compuesta por el valor residual del activo (si es que lo tiene) y el reciclaje de sus componentes, como está fuertemente involucrado con el reciclaje su valoración se hace en base al LCA y se presenta al final del capítulo 11.

10.2. Compra

La mayoría de los buses eléctricos que se utilizan en la Región Metropolitana y que se comercializan en el mundo provienen de la República de China. Entre los costos de compra se consideran todos los costos necesarios para la puesta en servicio: bus, infraestructura, equipos y capacitaciones. Estos costos se presentan en la tabla 10.1.

⁸ En Chile, todos los buses nuevos para RED, independiente de la tecnología, llegan al puerto de San Antonio.

Tabla 10.1 Costos de compra

Nombre de la Variable	Unidad	Valor
Tasa de descuento ⁹	%	6-10
Costo compra bus eléctrico	USD	300'000-350'000
Costo compra bus diésel	USD	210'000- 280'000
Costo compra baterías	UDS	20'000
Costo de compra instalación de carga	USD	100'000
Costo de compra cargadores	USD	5'000
Costos de capacitación	USD	2'000

10.3. Fase de Uso

La fase de uso está compuesta principalmente por los costos de la energía utilizada para propulsar los buses y los costos de mantenimiento. Los costos de mantenimiento se pueden clasificar en: costos por mantenimiento programado y no programados o por falla repentina. El costo de mantenimiento programado se extrae de la literatura. El costo de mantenimiento por falla repentina se modela posteriormente¹⁰. Si bien, se podría considerar durante la fase de uso un costo asociado a la degradación del activo y su rendimiento, estos costos serán modelados implícitamente en el capítulo 12 del presente informe. En la tabla 10.2 se presentan los costos de compra, en la columna "Valor", el símbolo "*" indica que este valor se modela implícitamente en los capítulos 11 y 12 y el símbolo "-" indica que es un valor de carácter confidencial.

⁹La tasa de descuento o coste de capital es una medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un costo futuro.

¹⁰Dada la degradación de un activo $D(t)$ en el tiempo se modela la probabilidad de una falla no planificada como la $-\exp((D(t)-\mu)/2*\sigma)$. En donde \exp es la función exponencial, μ es el costo de mantenimiento promedio y σ es la desviación estándar.

Tabla 10.2 Costos de compra para la fase de uso.

Nombre de la Variable	Unidad	Valor
Degradación Dt	%	*
Costo de la energía	USD/MJ	0.384
Costo diésel	USD/L	0.653
Salarios	USD/año	20'000
Depreciación	Tipo	Lineal
Seguros	USD/año	-
Flujo de pasajeros	N° personas/por bus	40-50
Costo de mantenimiento contrato EV	USD/km	0.2075
Costo de mantenimiento contrato ICE	USD/km	0.3943
Rendimiento	kWh/km%	*
Distancia recorrida	km/año	73'000- 87'600

Al observar la tabla 10.2 se puede notar que los costos de adquisición de los buses eléctricos son elevados con respecto a los buses diésel, además, para poder operar estas nuevas flotas eléctricas es necesario contar con nuevas instalaciones para la gestión de la carga y capacitaciones para personal en esta nueva tecnología. En contraste al analizar la fase de uso se aprecian las mayores ventajas de los buses eléctricos con respecto a los buses diésel, pues el mantenimiento de los buses eléctricos es mucho más barato en comparación al diésel, esto se debe principalmente a que un bus eléctrico posee menos componentes.

10.4. Fase de reciclaje o fin de vida útil

Esta fase contiene los costos de reciclaje, emisiones, salud y fin de vida útil en general. Estos costos son modelados implícitamente en los capítulos 11 y 12 en el análisis de ciclo de vida (LCA) y estimación del costo total de propiedad (TCO).

11. LCA y LCC clásicos

El propósito de este capítulo es mostrar los resultados obtenidos de modelos clásicos de *LCA* y *LCC* descritos en el capítulo 8. Recapitulando, *LCA* y *LCC* clásicos contemplan: la identificación de objetivos y límites, definición de unidad funcional, inventario de datos, interpretación de información y finalmente la evaluación económica de los resultados. Los objetivos y límites fueron identificados en el capítulo 8, específicamente en las Figuras 8.2 y 8.3. La unidad funcional propuesta, como se indicó en el capítulo 7 y 8 corresponde a un bus eléctrico o diésel para facilitar el cálculo. El inventario de datos de *LCA* y su interpretación se abordan en esta sección, primeramente, se despliega la información desarrollando cualitativa y cuantitativamente la unidad funcional. Luego se muestran los resultados del modelo de *LCA* para cada fase del ciclo de vida donde se obtienen las distintas emisiones. Y finalmente se presenta el modelo económico *LCC* y su acople con la información ambiental, donde se valoran las emisiones para poder realizar la evaluación económica y finalmente la comparación entre tecnologías en el capítulo 12.

El formato que se usa para desplegar la información es definir cuantitativamente la unidad funcional y con ella mostrar los resultados del modelo de *LCA* para cada fase del ciclo de vida. Finalmente se muestra el modelo económico *LCC* y como se acopla la información ambiental.

11.1. LCA resultados: unidad funcional extracción

La unidad funcional que se considera más adecuada para realizar los cálculos de *LCA* es un bus eléctrico o diésel. La razón detrás de esta elección es principalmente que facilitan los cálculos y además es la más usada en los estudios internacionales como puede verse en el capítulo 6. Un bus diésel o eléctrico puede dividirse en dos bloques principales: el tren de poder, que son los componentes que permiten que se mueva el bus, y el habitáculo, que es la estructura que se monta sobre el tren de poder para que las personas puedan desplazarse en este y es común para ambas tecnologías (Singh, M. K. (1980) [26]).

Para el análisis de la unidad funcional se debe considerar la composición de los bloques según tecnología. En (Yang, Z., Deng, B., Deng, M., & Sun, G. (2018), [27]) se presenta un detalle de composición y pesos del habitáculo y tren de poder. El peso promedio del habitáculo de un bus es de aproximadamente 9500 kg. El peso promedio del tren de poder varía según la tecnología sea diésel o eléctrico. El tren de poder diésel tiene una masa aproximada de 2500 kg. El tren de poder del bus eléctrico, el cual está constituido por dos partes diferenciables que son el tren de poder propiamente tal y el banco de batería, posee un peso aproximado de 5500 kg, de los cuales 2000 kg corresponden al tren. La tabla 11.1 muestra la composición porcentual de los componentes de la unidad funcional.

Tabla 11.1 Composición porcentual de la unidad funcional.

Materiales	Porcentaje másico		
	Habitáculo	Tren de poder diésel	Tren de poder eléctrico
Acero	54.2	59.4	45.2
Hierro	7.9	7.9	27.9
Aluminio	11.9	1.7	12.3
Plástico	9.2	10.1	4.9
Compuestos	1	1	0
Electrónicos	0	0	1.9
Otros (Cobre)	15.8	2.2	7.8

Considerando la composición de la unidad funcional antes expuesta se realiza a continuación la estimación de emisiones de CO₂ equivalente en la extracción de los materiales para la manufactura por bloque y tecnología.

11.1.1. LCA resultados extracción: Habitáculo

Se realizan los análisis de ciclo de vida para la extracción de los materiales del habitáculo. Se presentan a continuación los resultados para la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Los demás impactos (acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog y toxicidad humana) pueden ser vistos en las tablas adjuntas en el anexo B sobre LCA.

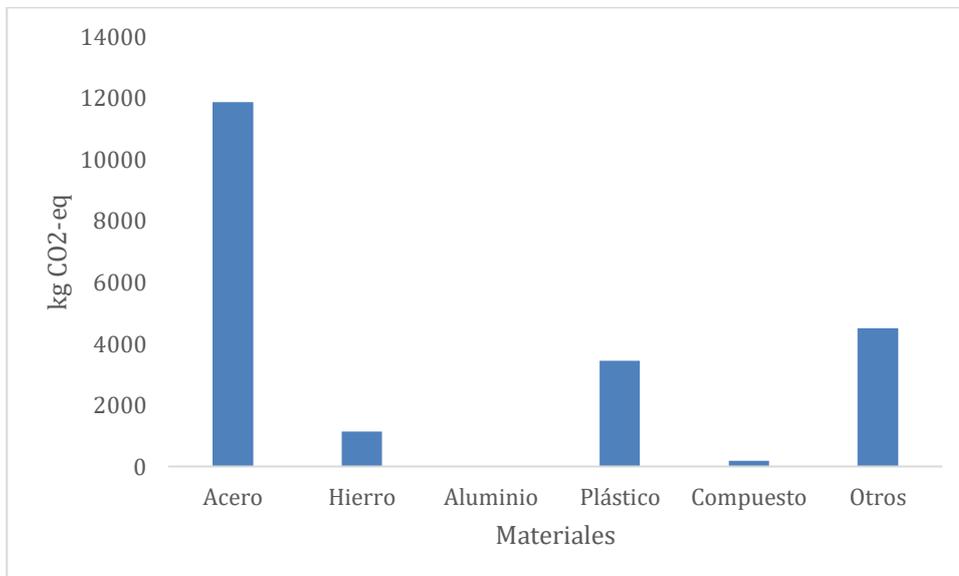


Figura 11.1 Generación de CO₂ en la extracción de materiales para el habitáculo.

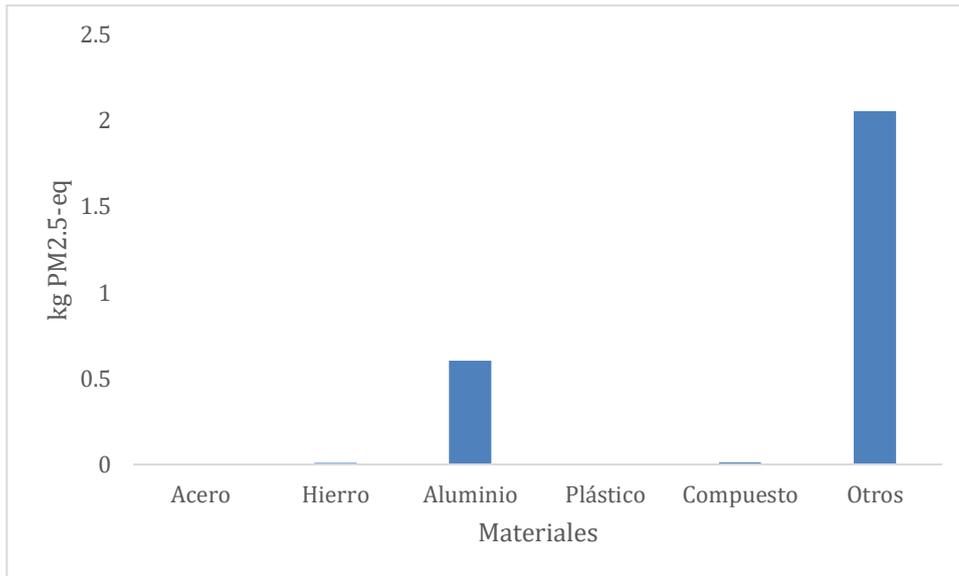


Figura 11.2 Generación de PM_{2.5} en la extracción de materiales para el habitáculo.

Al observar las Figuras 11.1 y 11.2 se puede interpretar que en la generación de CO₂ los componentes que generan las mayores emisiones son el acero y el plástico, esto se debe a dos motivos principales, primero, la confección tanto de acero como de plástico es altamente contaminante y en segundo que son dos de los componentes con mayor presencia en el habitáculo.

11.1.2. LCA resultados extracción: Tren de poder diésel

Se realizan los análisis de ciclo de vida para la extracción de los materiales del tren de poder diésel. Se presentan a continuación los resultados para la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Los demás impactos (acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog y toxicidad humana) pueden ser vistos en las tablas adjuntas en el anexo B sobre LCA.

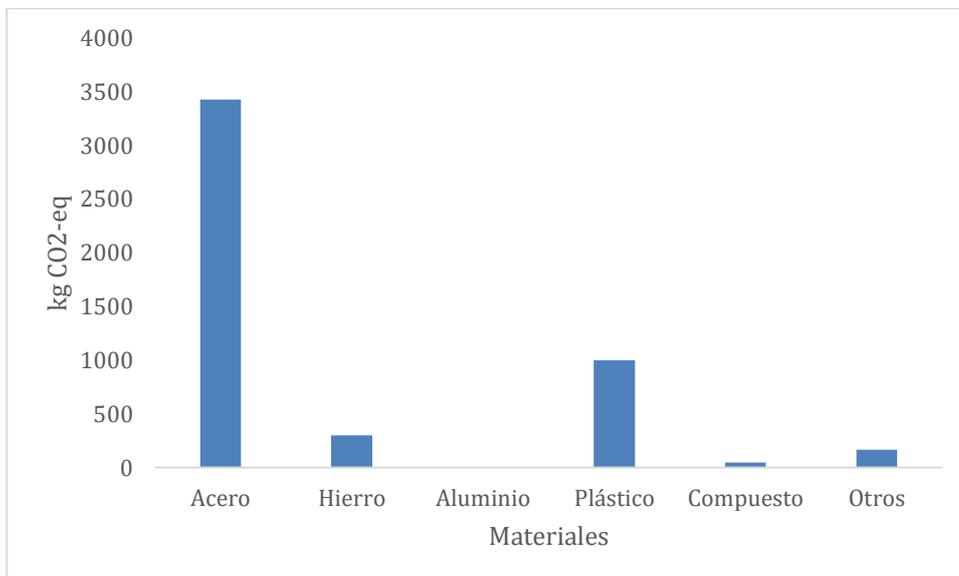


Figura 11.3 Generación de CO₂ en la extracción de materiales para el tren de poder de un bus diésel.

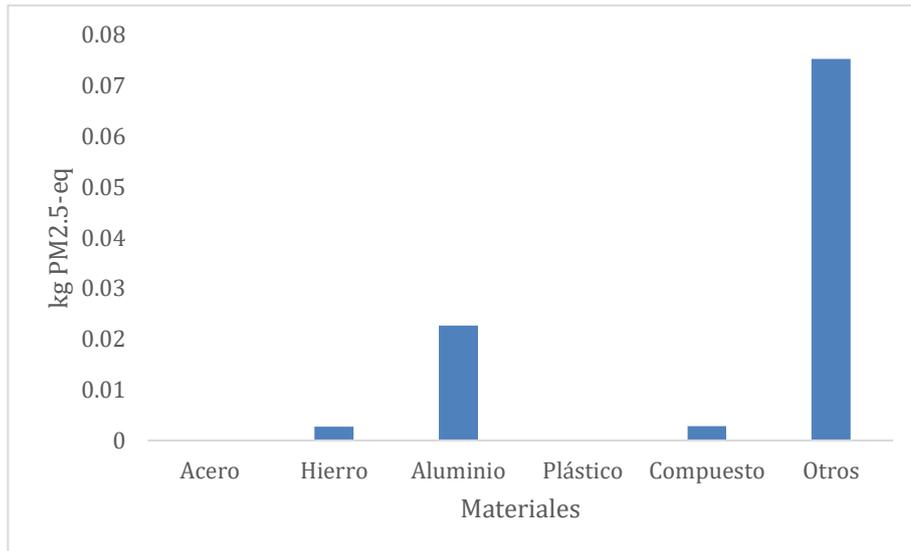


Figura 11.4 Generación de PM_{2.5} en la extracción de materiales para el tren de poder de un bus diésel.

Al observar las Figuras 11.3 y 11.4 se puede interpretar que en la generación de CO₂ los componentes que generan las mayores emisiones son el acero y el plástico, al igual que en el caso del habitáculo, Por otro lado, desde el punto de vista de la generación de material particulado fino PM_{2.5} la mayor emisión viene por el uso de cobre principalmente en el cableado.

11.1.3. LCA resultados extracción: Tren de poder Eléctricos

Se realizan los análisis de ciclo de vida para la extracción de los materiales del tren de poder de un bus eléctrico. Se presentan a continuación los resultados para la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Los demás impactos (acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog y toxicidad humana) pueden ser vistos en las tablas en el anexo B sobre LCA.

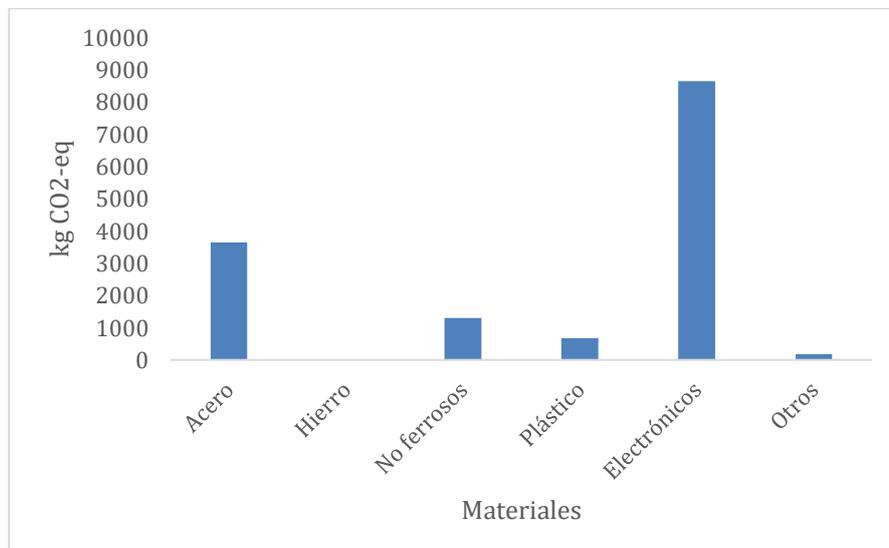


Figura 11.5 Generación de CO₂ en la extracción de materiales para el tren de poder de un bus eléctrico.

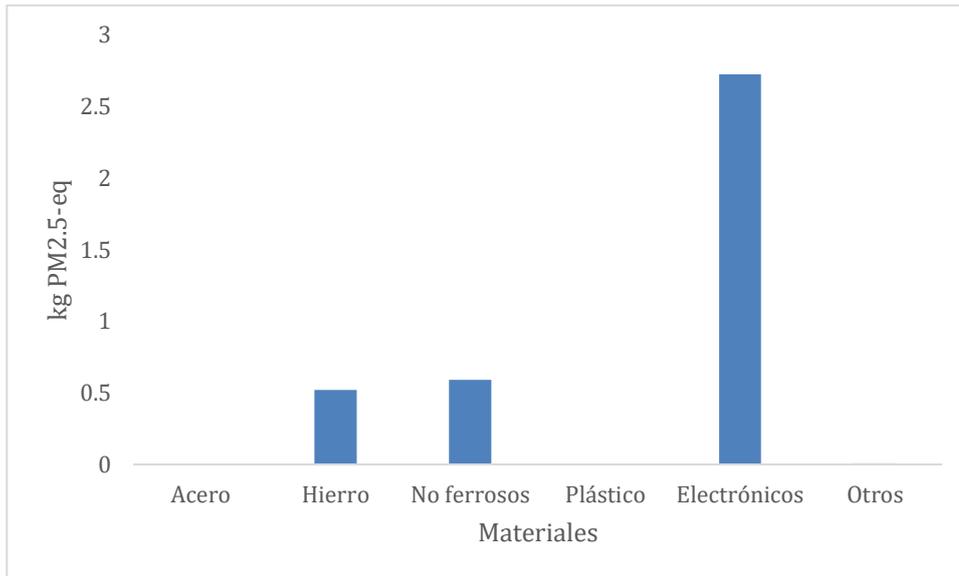


Figura 11.6 Generación de PM_{2.5} en la extracción de materiales para el tren de poder de un bus eléctrico.

Al observar las figuras 11.5 y 11.6 se puede apreciar una mayor generación de dióxido de carbono y material particulado fino para el caso del tren de poder eléctrico que en el caso diésel, esto se explica por dos motivos. El primero tiene que ver con el hecho de que el tren de poder eléctrico es más pesado, y el segundo con el hecho de que en el caso del bus eléctrico existe una mayor cantidad de componentes electrónicos que usualmente son más contaminantes.

En la figura 11.7 se decide agregar el impacto del banco de baterías de litio al tren de poder, se puede observar que el banco de baterías posee el mayor impacto medio ambiental, esto se debe a que está constituido por elementos que se ocupan en la industria electrónica y que son muy contaminantes.

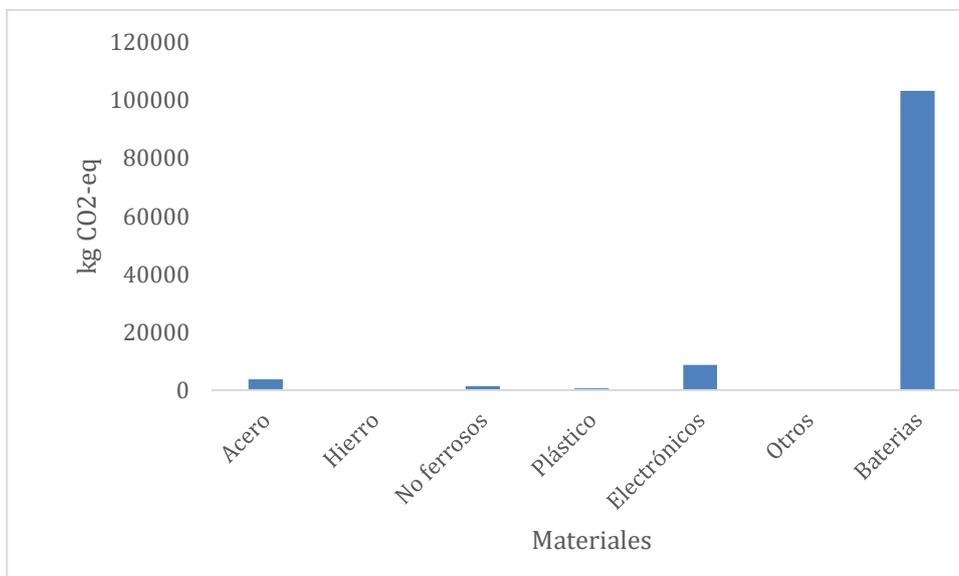


Figura 11.7 Generación de CO₂ en la extracción de materiales para el tren de poder de un bus eléctrico agregando el banco de baterías (con su manufactura).

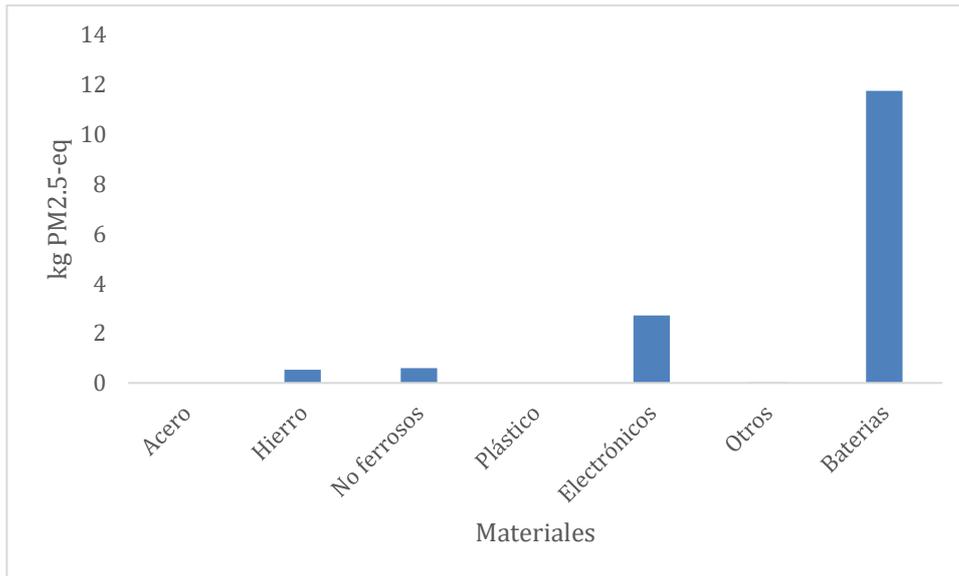


Figura 11.8 Generación de PM_{2.5} en la extracción de materiales para el tren de poder de un bus eléctrico agregando el banco de baterías (con su manufactura).

Una vez terminada la cuantificación de los impactos ambientales por la extracción del recurso, se cuantifican los impactos desde el punto de vista de la manufactura de estos para transformarlos en un bus eléctrico o diésel.

11.2. LCA resultados: procesos de manufactura

Para realizar el inventario e interpretación del LCA correspondiente a la etapa de manufactura, se investigan los principales procesos de manufactura por los que se ve involucrado un bus diésel y eléctrico. Para ello se presenta la información dividida según como se definió la unidad funcional previamente, es decir, mediante el habitáculo, tren de poder diésel y eléctrico.

La tabla 11.2 presenta los principales procesos de manufactura para la confección de la unidad funcional identificando los procesos para el habitáculo y el tren de poder (Helmerts, E., Dietz, J., & Weiss, M. (2020), [28]). Se puede observar que algunos de los valores de los porcentajes coinciden con los de la tabla 11.1, esto se debe a que estos procesos de manufactura se están aplicando sobre los materiales. Los nombres de los procesos se presentan en idioma español e inglés, pues de esta forma se le hará más fácil el encontrarlos en la literatura académica.

Tabla 11.2 Procesos de manufactura del habitáculo de la unidad funcional.

Proceso de manufactura	Porcentaje másico ¹¹		
	Habitáculo	Tren de poder diésel	Tren de poder eléctrico
Laminación acero (Sheet rolling, steel)	54.2	0	22.6
Laminación aluminio (Sheet rolling, aluminium)	7.9	0	5
Trefilado (Wire drawing)	11.9	0	0
Trabajo de metales promedio (Average metal working)	9.2	0	0
Compuestos Moldeo por inyección (Injection moulding)	1	0	10
Templado de vidrio plano (Tempering flat glass)	15.8	0	0
Agua del grifo (Tap water)	1	1	0
Fabricación de productos de acero (Steel product manufacturing)	0	59.4	22.6
Fabricación de productos de aluminio (Aluminium product manufacturing)	0	1.7	4
Fabricación de productos de cobre (Copper product manufacturing)	0	2.2	5
Fabricación de productos metálicos en general (Metal product manufacturing)	0	7.9	8
Oxígeno líquido (Liquid oxygen)	0	17.7	2.8
Recubrimiento selectivo (Selective coating)	0		5

¹¹Porcentaje del peso (por ejemplo, kg) sobre el total

11.2.1. LCA resultados manufactura: Habitación

Con la información presentada en la tabla 11.2 de los procesos de manufactura del habitáculo se realizan los análisis de ciclo de vida. Se presentan a continuación los resultados para la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Los demás impactos (acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog y toxicidad humana) pueden ser vistos en las tablas adjuntas en el anexo B sobre LCA.

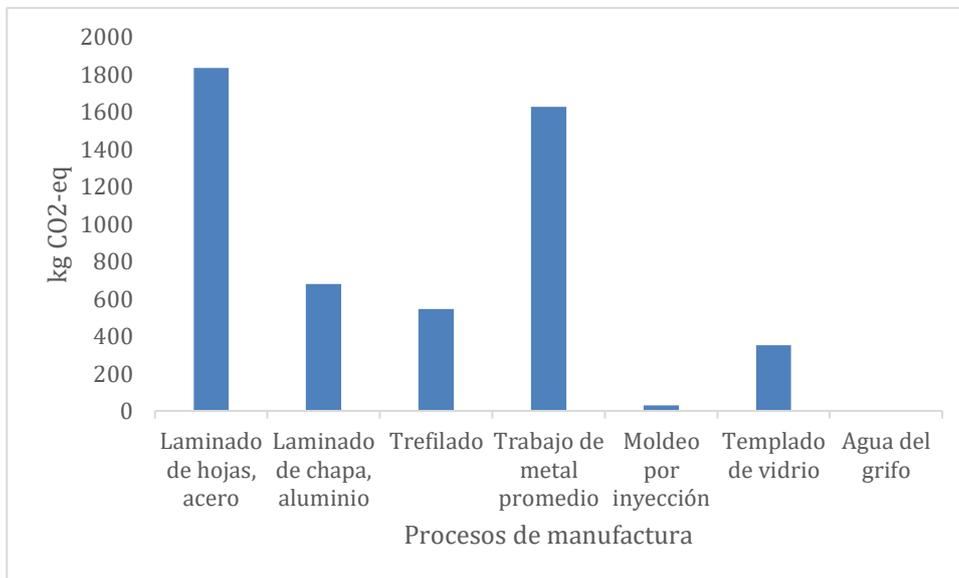


Figura 11.9 Generación de CO₂ en los procesos de manufactura de materiales para el habitáculo

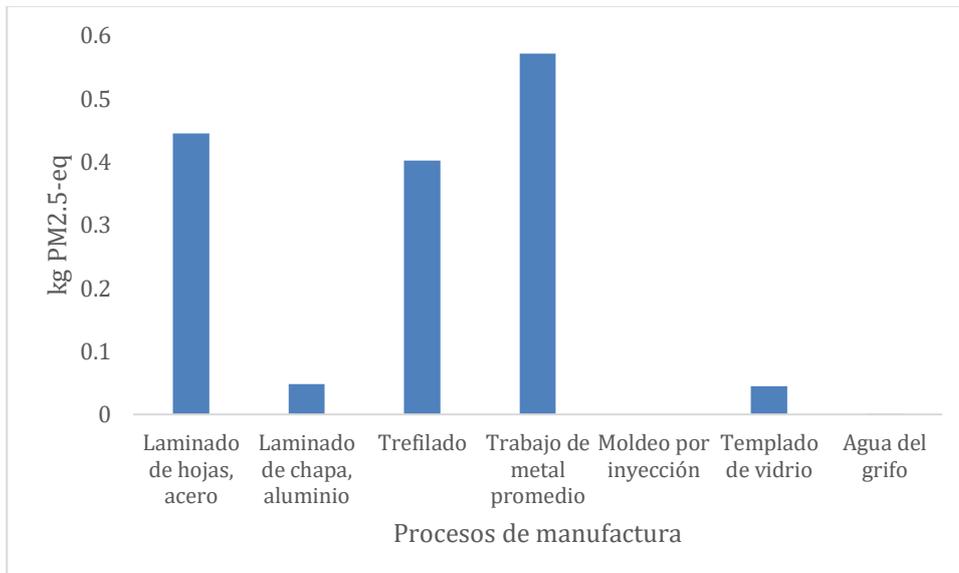
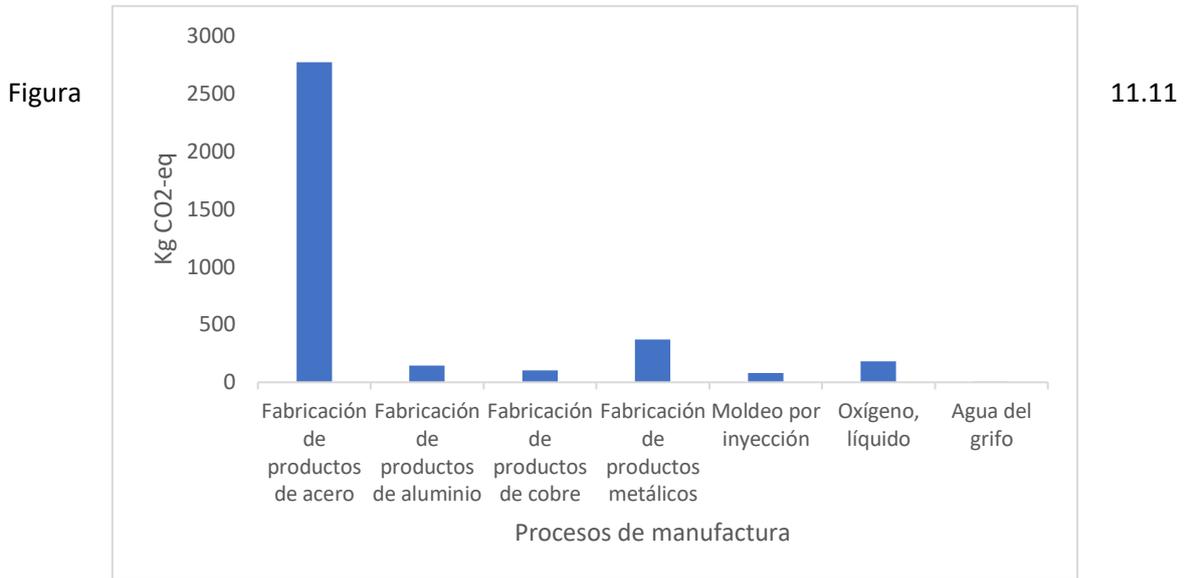


Figura 11.10 Generación de PM_{2.5} en los procesos de manufactura de materiales para el habitáculo

Al observar las figuras 11.9 y 11.10 las principales actividades que generan emisiones en la manufactura del habitáculo corresponden al trabajo con metales y laminación de acero.

11.2.2. LCA resultados manufactura: Tren de poder diésel

Con la información presentada en la tabla 11.2 de los procesos de manufactura del tren de poder diésel se realiza el análisis de ciclo de vida. Se presentan a continuación los resultados para la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Los demás impactos (acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog y toxicidad humana) pueden ser vistos en las tablas adjuntas en el anexo B sobre LCA.



Generación de CO_2 en los procesos de manufactura de materiales para el tren de poder de un bus

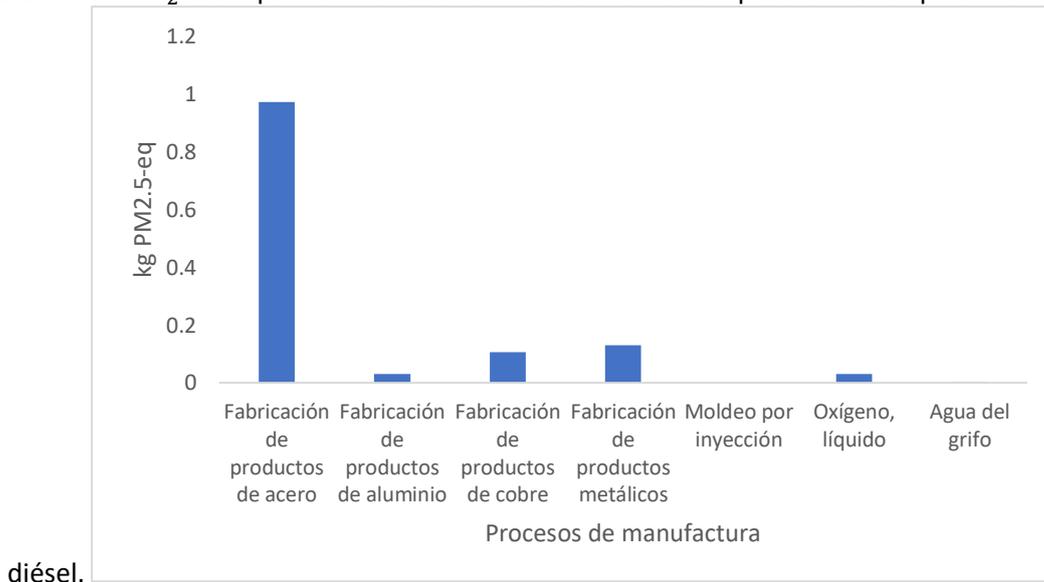


Figura 11.12 Generación de $PM_{2.5}$ en los procesos de manufactura de materiales para el tren de poder un bus diésel.

11.2.3. LCA resultados manufactura: Tren de poder eléctrico

Con la información presentada en la tabla 11.2 de los procesos de manufactura del tren de poder eléctrico se realiza el análisis de ciclo de vida. Se presentan a continuación los resultados para la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Los demás impactos (acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, smog y toxicidad humana) pueden ser vistos en las tablas adjuntas en el anexo B sobre LCA.

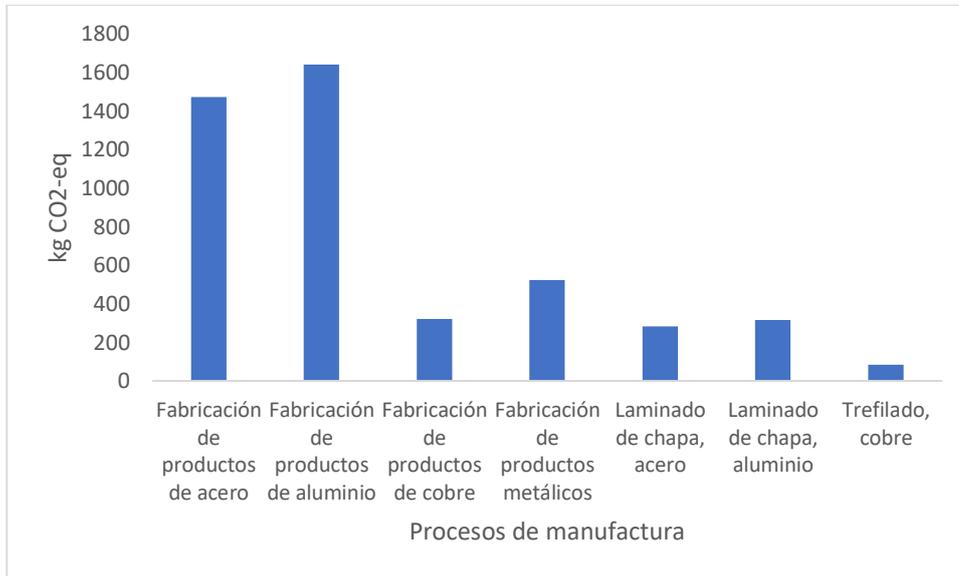


Figura 11.13 Generación de CO_2 en los procesos de manufactura de materiales para el tren de poder de un bus eléctrico.

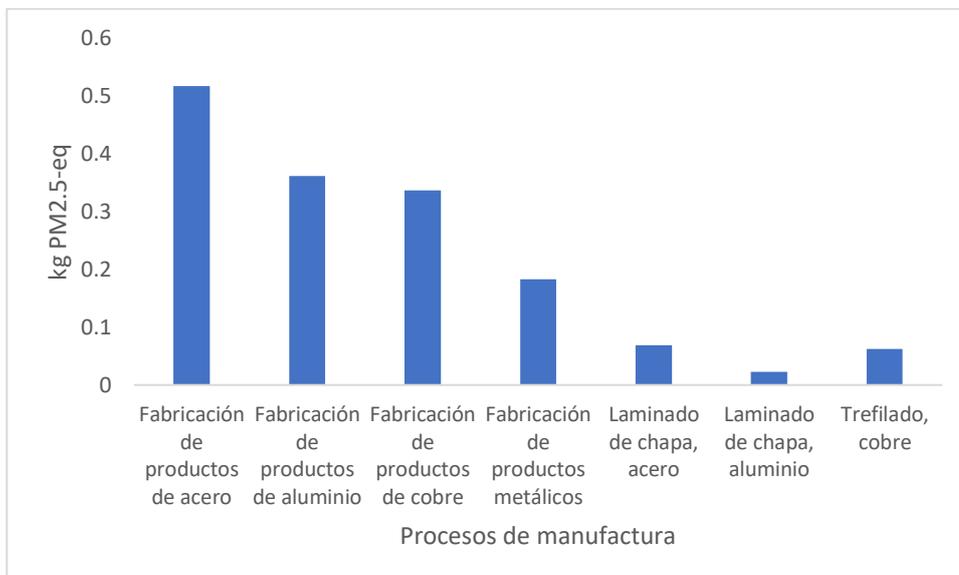


Figura 11.14 Generación de $PM_{2.5}$ en los procesos de manufactura de materiales para el tren de poder un bus eléctrico.

Al observar las figuras 11.11 a 11.14 se puede notar que el proceso de manufactura de un tren de poder para buses diésel es más contaminante tanto en generación de dióxido de carbono como de material particulado fino, esto se debe a que la contribución por componentes eléctricos ya fue medida con anterioridad en la extracción y además que en general el tren de poder de un bus diésel está compuesto de una mayor cantidad de acero lo que lo hace más contaminante.

11.3. LCA resultados: Fase de uso

Una vez terminado el proceso de manufactura, se procede a modelar la fase de uso de un bus eléctrico. Para el caso de un bus diésel, esta puede verse en la literatura (Quarles, N., Kockelman, K. M., & Mohamed, M. (2020), [36]). Como referencia se considera para este estudio que un bus diésel de tecnología Euro VI produce 500 a 600 g de CO_2 por km recorrido y 0.01 a 0.015 g de $PM_{2.5}$ por km recorrido.

Tabla 11.3 Emisiones de un bus diésel.

g CO_2/km	g $PM_{2.5}$/km	g NO_x/km	g HCT¹²/km
500-600	0.1-0.15	0.17-0.24	0.06-0.11

Con respecto a la fase de uso en un bus eléctrico esta se modela considerando que el bus ocupa energía de la red eléctrica (lo cual sucede en la realidad) para cargar sus bancos de baterías. Es por esta razón que se considera que por cada unidad de energía (MJ) consumida por el bus a lo largo de su operación por la Región Metropolitana está generando emisiones que provienen de las fuentes que constituyen la matriz energética de Chile.

En la siguiente imagen se observa la composición que posee la actual matriz energética de Chile, en términos de capacidad instalada, según indica el reporte anual 2019 de la Asociación de generadoras de Chile [30].

¹² Hidrocarburos Totales

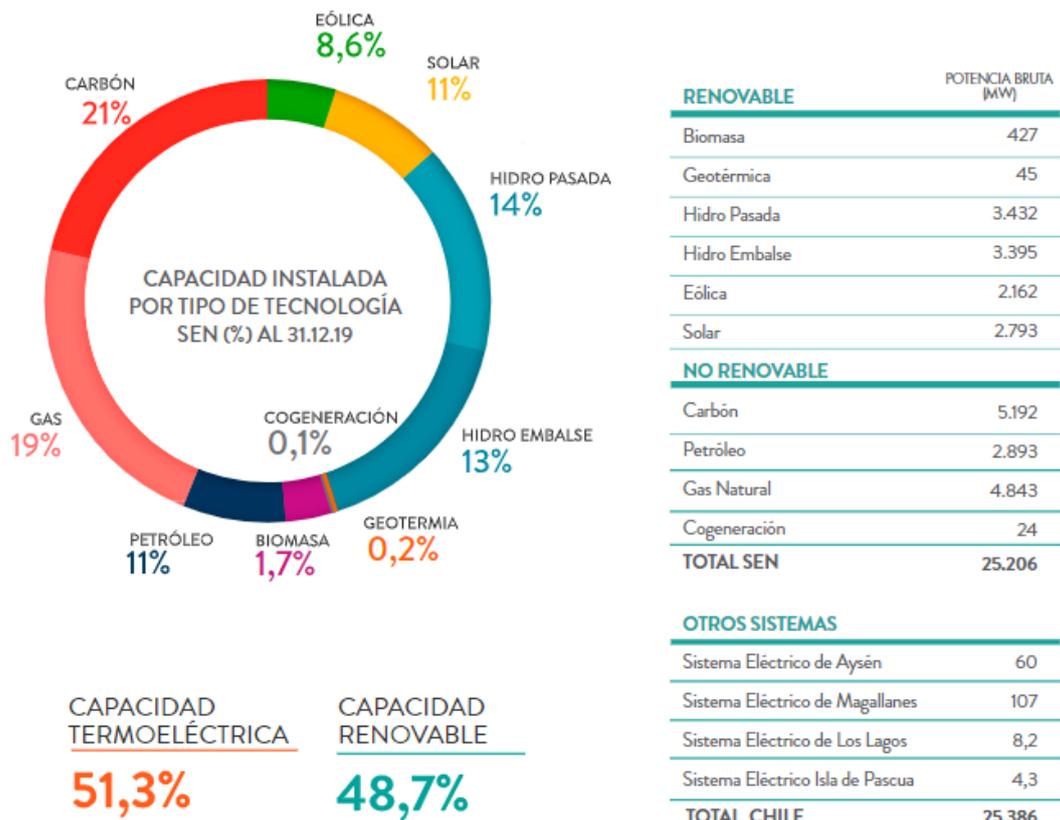


Figura 11.15 Matriz energética de Chile [30].

Para la estimación de emisiones en fase de uso se considerará la generación bruta por tipo de tecnología indicada en el reporte antes indicado [30], en el cual indica que la generación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) durante el 2019 fue de 77.311 GWh. Del total generado, un 55,8% fue aportado por centrales termoeléctricas (36,7% carbón, 18,2% gas y 0,9% petróleo), un 26,9% por centrales hidroeléctricas, un 6,2% por centrales eólicas, un 8,2% por centrales solares fotovoltaicas, y el restante 2,9% por centrales de biomasa (2,4%), geotermia (0,3%) y cogeneración (0,2%).

Al modelar se obtienen los resultados de emisiones que se pueden ver en las figuras 11.16 y 11.17.

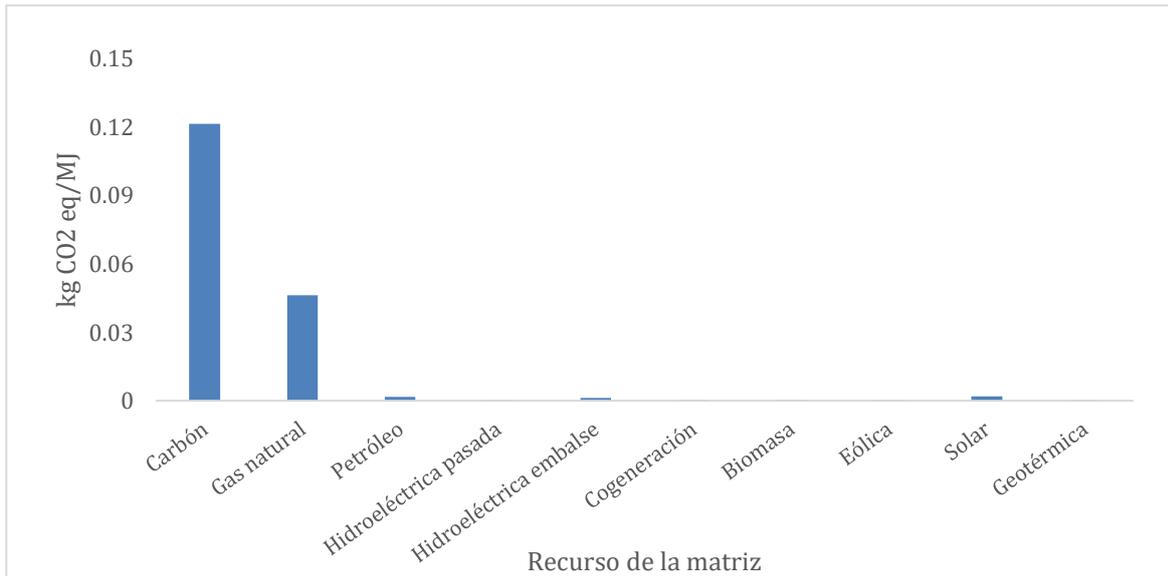


Figura 11.16 Generación de CO_2 por MJ ocupado en la matriz energética de Chile dividido por contribución.

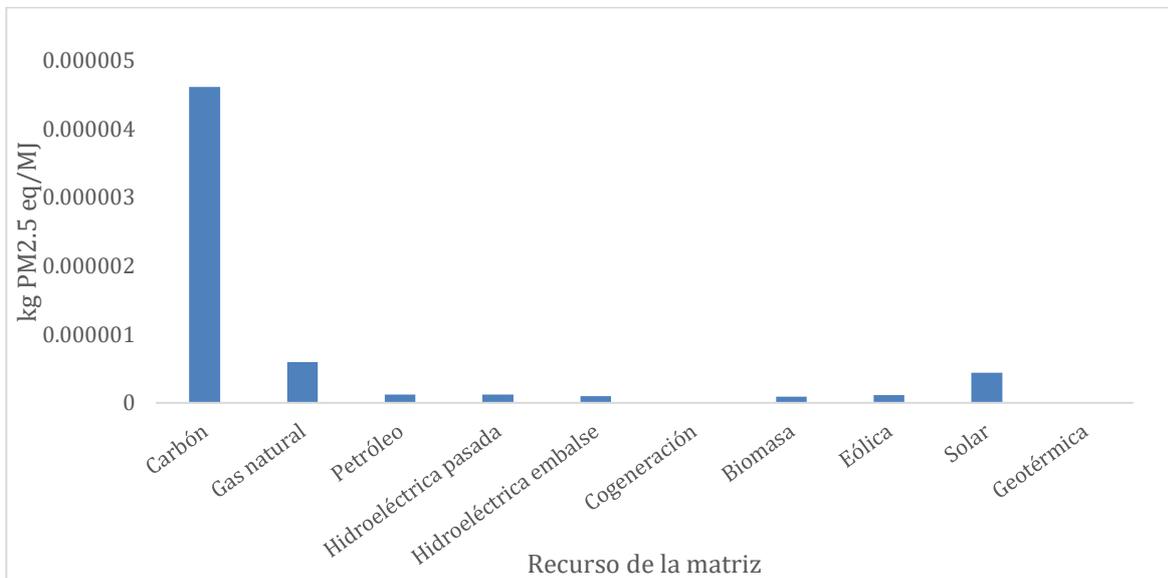


Figura 11.17 Generación de $PM_{2.5}$ por MJ ocupado en la matriz energética de Chile dividido por contribución.

Como se puede ver en las Figuras 11.16 y 11.17, las mayores contribuciones a la contaminación provienen del uso de carbón, gas natural y petróleo como combustibles para producir energía eléctrica. En total las emisiones generadas son $0.18356 \text{ kg } CO_2/MJ$ y $6.20537E-6 \text{ PM}_{2.5}/MJ$.

Las emisiones anteriores son generadas si la electricidad de carga del bus eléctrico se obtiene directamente de la matriz energética actual de Chile. Sin embargo, si se tiene en consideración la licitación de transporte público, que establece que los contratos de suministro eléctrico para los operadores de buses deben ser 100% renovable para el 2021¹³, entonces se obtiene un nuevo

¹³ Fuente: Ministerio de Energía de Chile

escenario de emisiones que depende de la tecnología de renovables a considerar. En las figuras 11.18 y 11.19 se considera 20% de cada tecnología (hidroeléctrica de pasada, hidroeléctrica de embalse, solar, eólica y geotérmica) y se puede apreciar que las tecnologías solar fotovoltaica e hidroeléctrica de embalse tienen emisiones atribuibles a su ciclo de vida mayores que las otras tecnologías, por lo que es importante, al momento de consolidar los contratos, identificar la cantidad de emisiones atribuibles a cada tecnología de renovables.

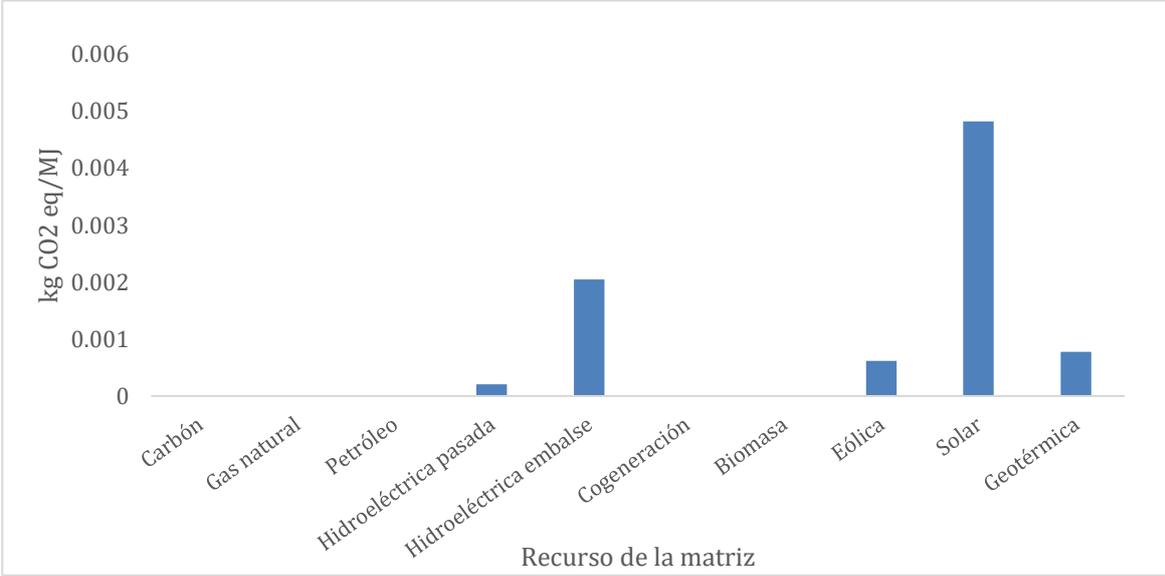


Figura 11.18 Generación de CO_2 por MJ ocupado, dividido por contribución, en el caso de que el contrato de suministro eléctrico considere un 100% de energías renovables con participación de un 20% de cada tecnología (hidroeléctrica de pasada, de embalse, solar, eólica y geotérmica).

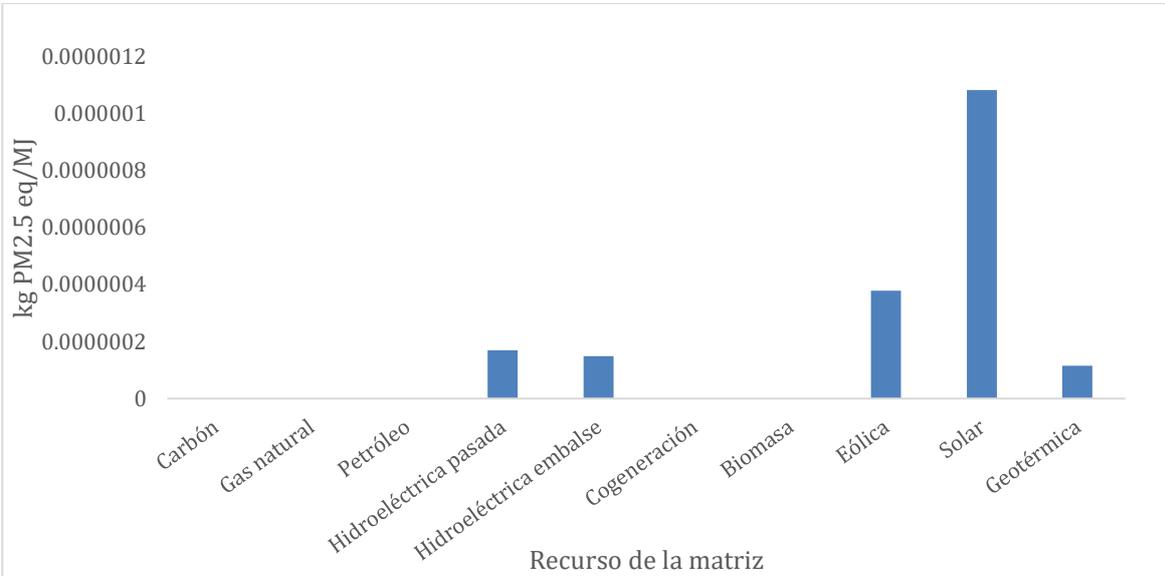


Figura 11.19 Generación de $PM_{2.5}$ por MJ ocupado, dividido por contribución, en el caso de que el contrato de suministro eléctrico considere un 100% de energías renovables con participación de un 20% de cada tecnología (hidroeléctrica de pasada, de embalse, solar, eólica y geotérmica).

Bajo el escenario 100% renovable se obtiene un total de emisiones generadas de 0.008466 kg CO_2 /MJ y 1.89352E-6 $PM_{2.5}$ /MJ.

En base a los resultados anteriores y teniendo en cuenta la meta de 70% de energías renovables de la matriz energética de Chile al 2050, para futuros análisis y toma de decisiones, se debe considerar que toda tecnología, incluyendo las renovables, presenta emisiones en su ciclo de vida, principalmente debido a la manufactura de los equipos, transporte y las etapas de construcción.

11.4. LCA resultados: Fase de fin de vida útil

Para finalizar el análisis de ciclo de vida, se modela la fase de fin de vida útil, en la cual se distinguen dos partes, en primer lugar, el reciclaje de los componentes y por otro lado la segunda vida útil del banco de baterías en el caso de los buses eléctricos.

11.4.1. Reciclaje

Para modelar el reciclaje de los componentes, se considera la tabla 11.1 en cuyas columnas se muestran la composición másica de los buses. Bajo el supuesto de que el 95% de los componentes pueden ser reciclados y el 5% son desechados (Quarles, N., Kockelman, K. M., & Mohamed, M. (2020), [29]), se procede a calcular el impacto medio ambiental de reciclar 95% del contenido másico de los buses y desechar el 5% a la tierra, se obtienen valores negativos, puesto que se considera que el material reciclado está ahorrando la extracción de la tierra nuevos materiales (usualmente el proceso de reciclaje es menos contaminante que el de extracción).

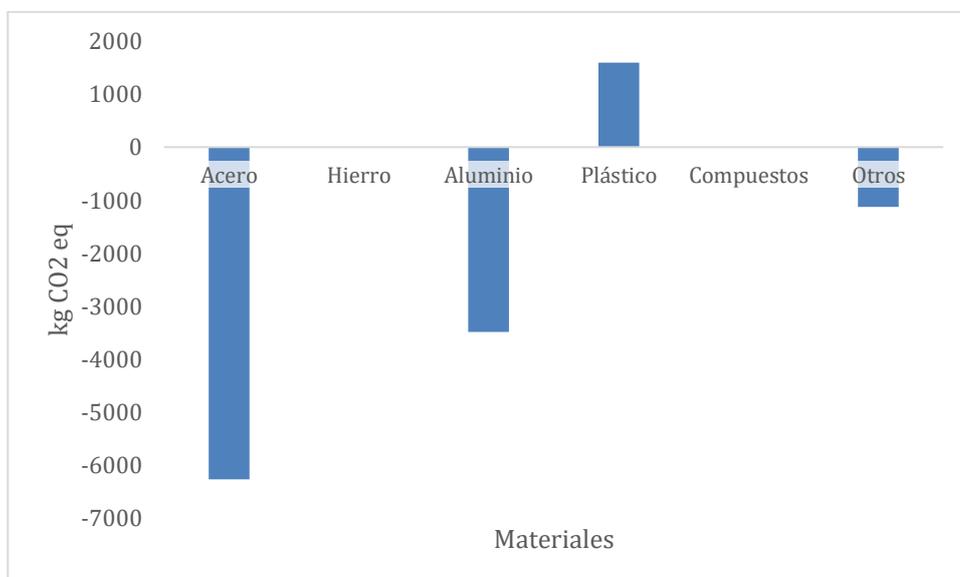


Figura 11.20 Disminución de CO_2 por reciclaje y manejo de residuos bus diésel

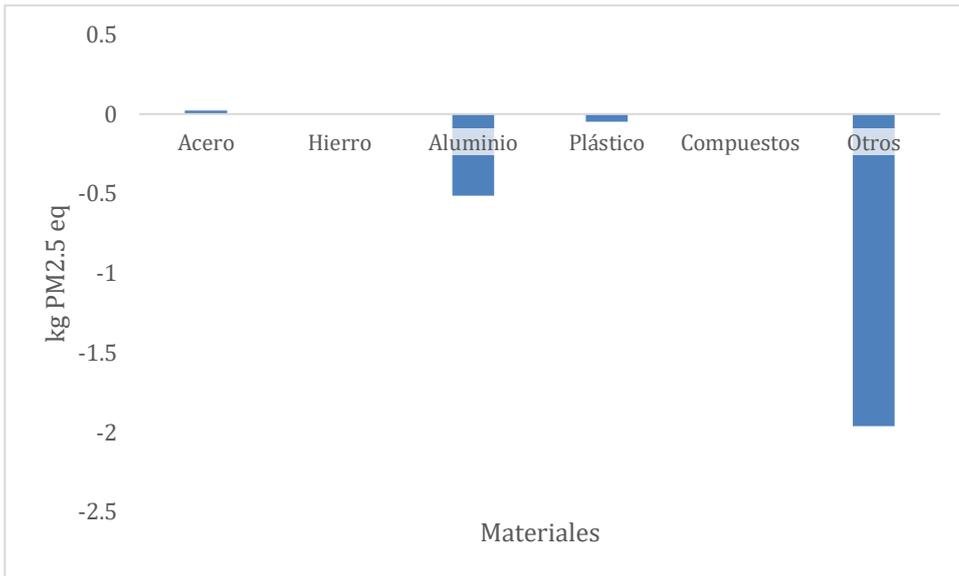


Figura 11.21 Disminución de $PM_{2.5}$ por reciclaje y manejo de residuos bus diésel

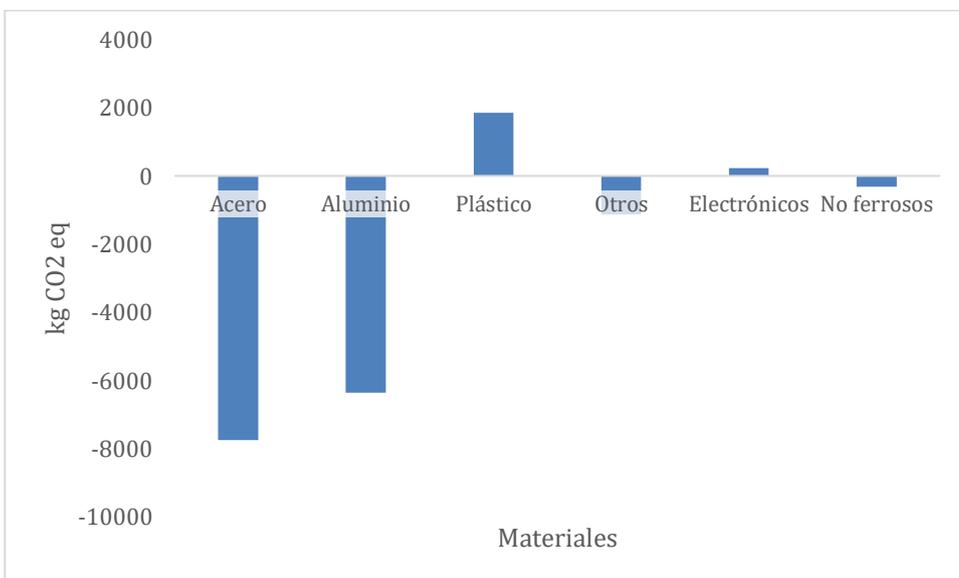


Figura 11.22 Disminución de CO_2 por reciclaje y manejo de residuos de bus eléctrico.

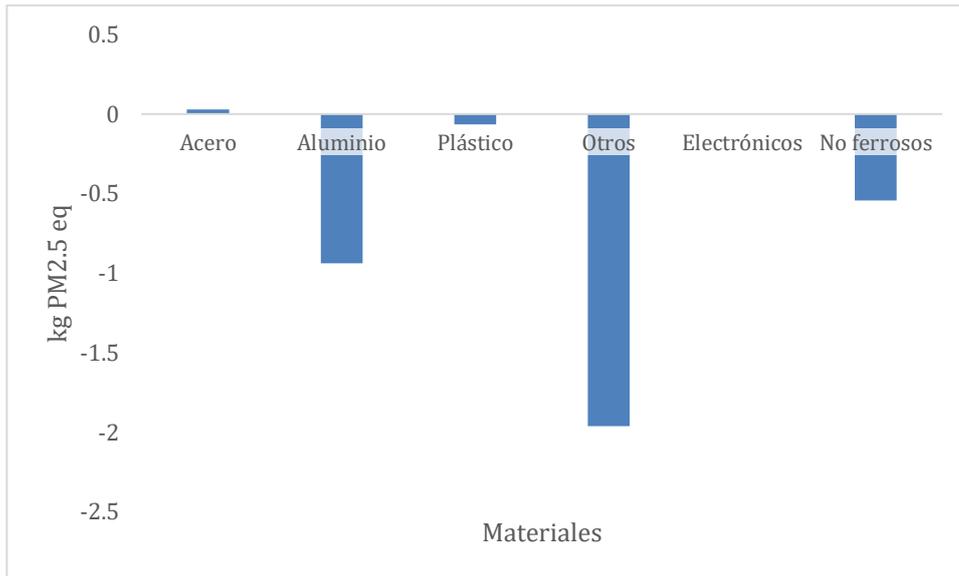


Figura 11.23 Disminución de CO_2 por reciclaje y manejo de residuos de bus eléctrico.

Se puede apreciar de forma general que un bus eléctrico posee más componentes que el bus diésel a reciclar o reutilizar, que vienen de la electrónica (componentes electrónicos y no ferrosos). Aun así, la contribución a la generación o disminución de emisiones mediante el reciclaje, de estos componentes adicionales, es baja en relación con los otros ítems de composición de los buses. Por lo que, en términos generales, desde el punto de vista del reciclaje y manejo de residuos, ambas tecnologías se pueden considerar similares al momento de realizar la evaluación de impacto ambiental y económico.

11.4.2. Reutilización de la batería

Con respecto a la reutilización de la batería, se modela su valor residual. Este valor residual es al cual se puede vender una vez que ha terminado su primera vida útil. La segunda vida útil de una batería puede considerar las siguientes aplicaciones: apoyo a la red eléctrica, apoyo en actividades agropecuarias, apoyo en actividades mineras, etc. En este estudio se utiliza una herramienta del *National Renewable Energy Laboratory* o NREL (Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019), [32]). Esta herramienta permite estimar el valor residual de mercado para bancos de baterías en su segunda vida útil. Entre las distintas aplicaciones de segunda vida, el uso de las baterías como soporte de la red eléctrica en zonas remotas presenta uno de los valores residuales más elevados, del 20% del valor de compra de una batería nueva. Por lo que, finalmente, se selecciona esta aplicación para poder estimar un valor de reutilización con propósito de modelado y cálculo de emisiones y TCO en este estudio.

11.5. LCA resultados: Comparación entre ambas tecnologías

Como cierre del análisis de ciclo de vida se presenta la comparación del ciclo de vida de bus diésel y eléctrico. Se supone una vida útil de 8 años y 200 km de recorrido diario, que corresponde a la vida garantizada por el fabricante de buses eléctricos y la distancia diaria promedio que realizan estos buses en la Región Metropolitana. A continuación, se presentan gráficas consolidadas de las emisiones en el ciclo de vida para cada tecnología.

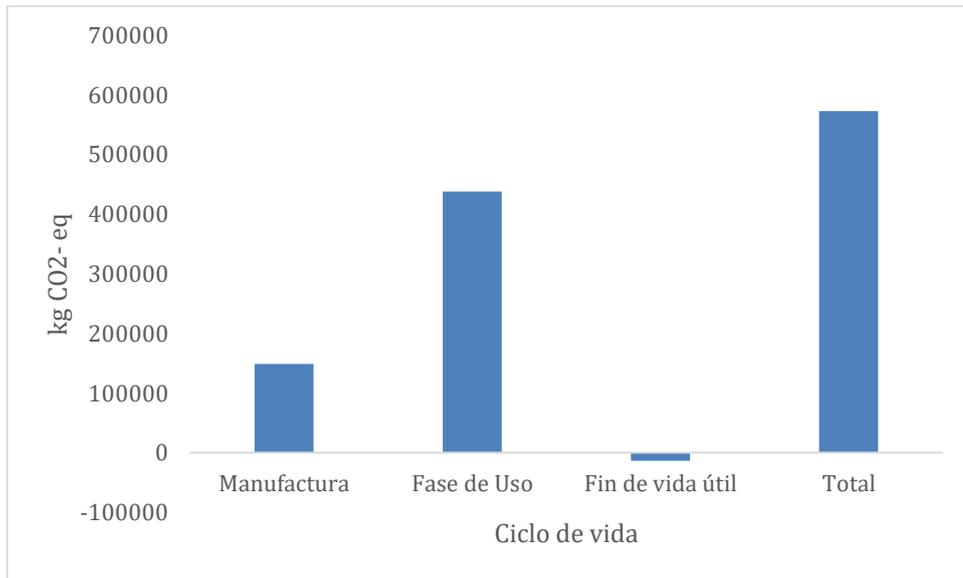


Figura 11.24 Generación de CO_2 en el ciclo de vida de un bus eléctrico considerando la matriz energética actual.

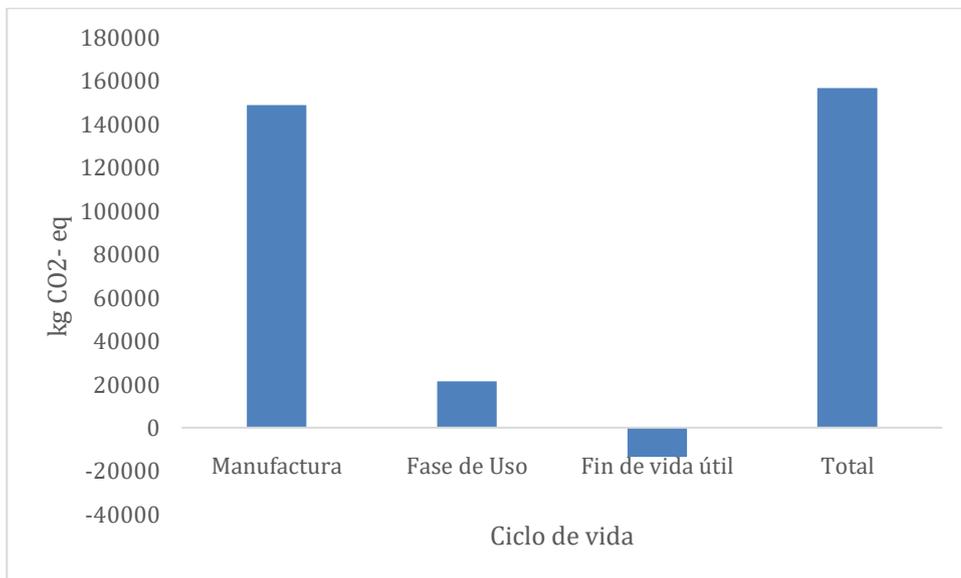


Figura 11.25 Generación de CO_2 en el ciclo de vida de un bus eléctrico considerando una matriz 100% renovable.

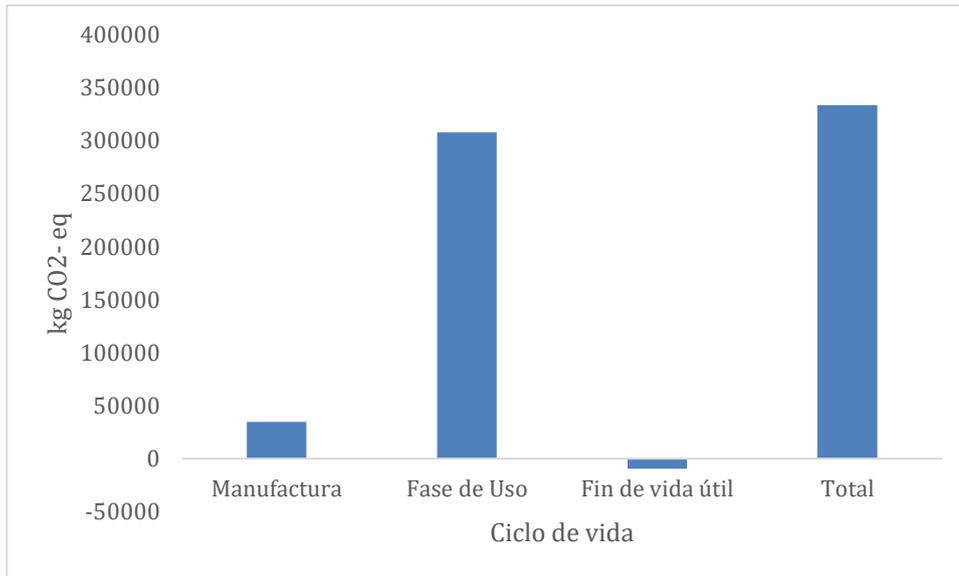


Figura 11.26 Generación de CO₂ en el ciclo de vida de un bus diésel

Al desplegar la información anterior de emisiones, en un gráfico de barras apiladas, se facilita la comparación de las tecnologías. Las siguientes gráficas permiten realizar la comparación de emisiones para el caso de la generación de dióxido de carbono y material particulado fino. Se presentan primeramente gráficas de comparación para el escenario de matriz energética actual y luego el escenario bajo contrato de suministro eléctrico 100% renovable.

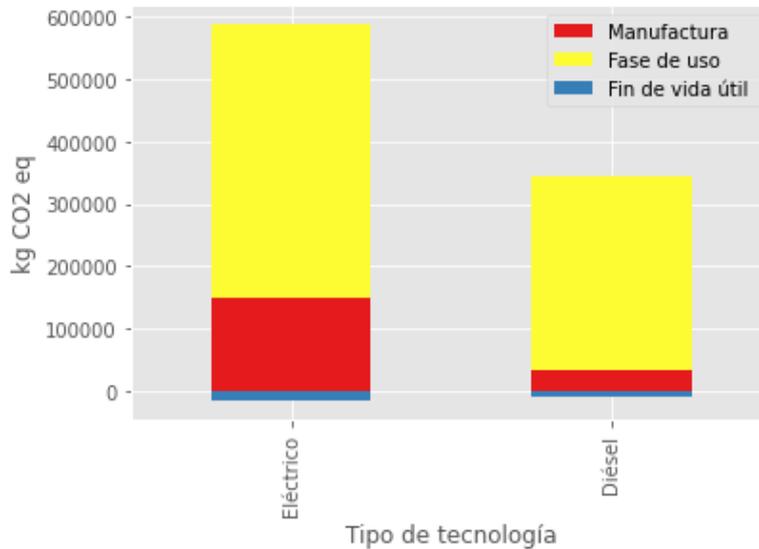


Figura 11.26 Comparación de la generación de CO₂ en el ciclo de vida de los buses para el caso de la matriz energética actual.

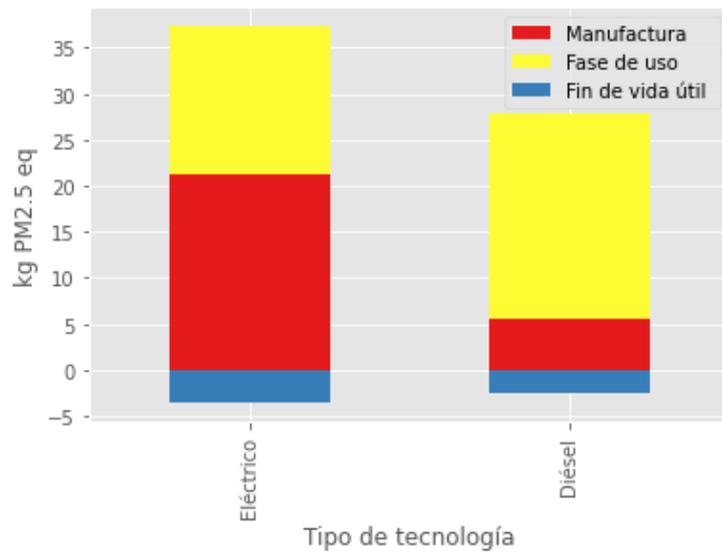


Figura 11.27 Comparación de la generación de $PM_{2.5}$ en el ciclo de vida de los buses para el caso de la matriz energética actual.

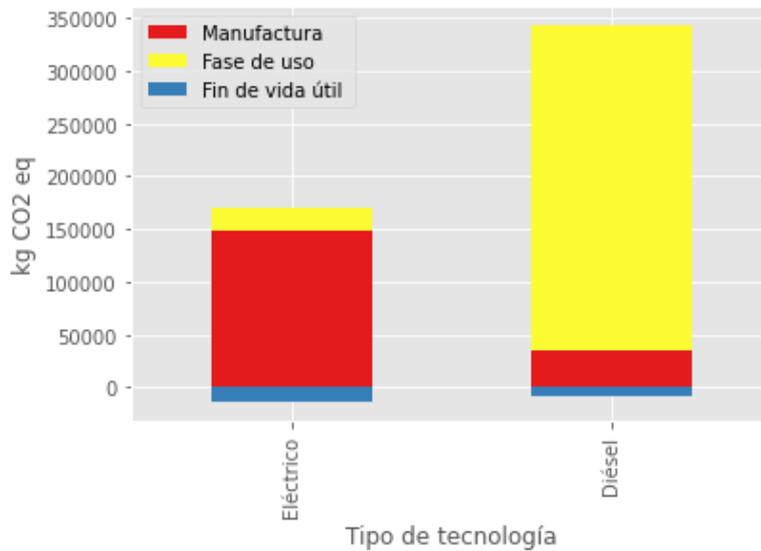


Figura 11.28 Comparación de la generación de CO_2 en el ciclo de vida de los buses para el caso de licitación con contratos 100% renovables.

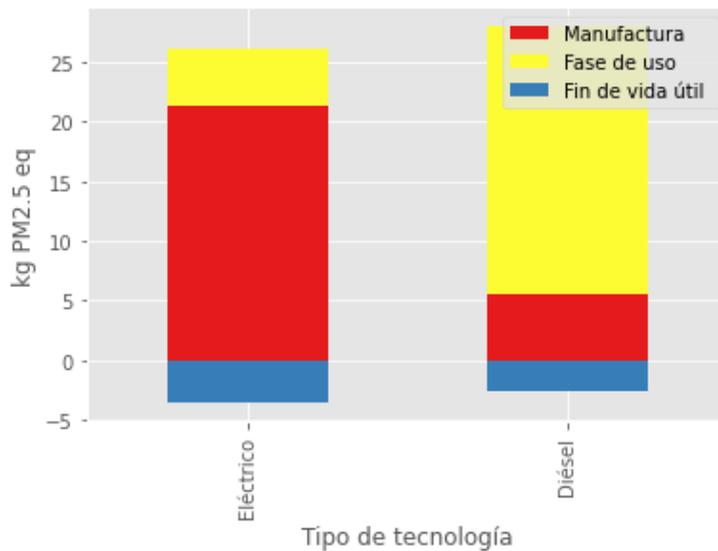


Figura 11.29 Comparación de la generación de PM_{2.5} en el ciclo de vida de los buses para el caso de licitación con contratos 100% renovables.

Al analizar las Figuras 11.26 y 11.27 de escenario actual de matriz energética nacional, se puede ver que tanto para el caso de la generación de CO₂ como de PM_{2.5} la tecnología de buses diésel genera menos emisiones a lo largo de todo su ciclo de vida. Y se debe acotar con respecto a la fase de manufactura, que ésta no depende del país donde se implemente la tecnología, sino de donde se manufactura, por lo que no se tiene control sobre esta fase y su cálculo es referencial y basado en la literatura.

Al analizar las Figuras 11.28 y 11.29 se puede observar que con las condiciones de la licitación de suministro eléctrico 100% renovable, tanto la generación de dióxido de carbono como de material particulado fino en la fase de uso, es menor en el caso de los buses eléctricos que para los buses diésel, con lo cual las emisiones totales de un bus eléctrico son menores que las emisiones de un bus diésel. En base lo anterior, y si se considera la creciente descarbonización de la matriz energética chilena, estas gráficas indican que una flota eléctrica que tenga un suministro eléctrico 100% renovable generará menos emisiones que una flota diésel.

Una vez acabado el análisis de ciclo de vida se presenta el modelo económico *LCC* para finalmente acoplar todos los resultados en el capítulo siguiente.

11.6. LCC: Modelo de eco costo y metodología de acople

El propósito de esta sección es introducir la matemática que hay detrás de la evaluación económica final de este estudio y cómo se cuantifican los impactos medio ambientales en un valor monetario, con el fin de hacer una comparación bajo la misma unidad (en este caso monetaria).

En primer lugar, los costos de fin de ciclo de vida se pueden observar en la siguiente tabla 11.4.

Tabla 11.4 Procesos de manufactura del tren de poder de un bus eléctrico.

Nombre de la Variable	Unidad	Valor
Costo ambiental	USD/kg CO ₂	0.14
Costo de salud	USD/kg PM _{2.5}	41.5
Valor residual baterías	%	20
Valor residual bus	-	Reciclaje

Los costos de la tabla 11.4 se obtienen de la siguiente forma:

- Los valores de los costos ambientales y de salud fueron obtenidos mediante los eco costos que se publican anualmente por la universidad de Delft (DELFT, T. (2017), [31]). Los eco costos corresponden a los costes de la carga medioambiental de un producto sobre la base de la prevención de esa carga, es decir, son los costos que deben hacerse para reducir la contaminación ambiental y el agotamiento de los materiales en nuestro mundo a un nivel que esté en línea con la capacidad de carga de nuestra tierra.
- Los valores residuales son estimados, como se mencionó en la sección anterior. El porcentaje del valor residual del banco de baterías se modela en la publicación (Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019), [32]) gracias a las herramientas del National Renewable Energy Laboratory o NREL. El valor monetario del bus sin incluir las baterías viene dado por el ahorro de contaminación, es decir, al reciclar un bus eléctrico como se vio en este capítulo se ahorran 13475 kg CO₂ lo que al valorizarlo mediante los eco costos nos dan un valor residual de 1886.5 USD. En el caso de un bus diésel se ahorran 9275 kg CO₂ lo que equivale a 1298.5 USD.

Se incluye la Figura 11.30 que nos muestra las proyecciones del precio del banco de baterías en el tiempo según el medio especializado en análisis económico Bloomberg, lo cual puede dar una estimación de cómo evolucionará el precio de los buses eléctricos en el tiempo.

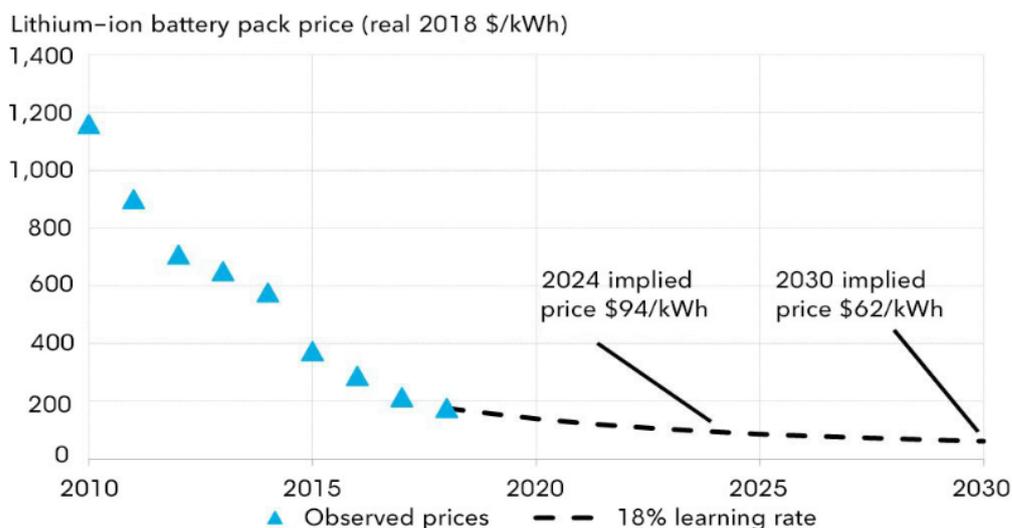


Figura 11.30 Proyección del precio de las baterías según Bloomberg.

Por último, se presenta en la Ecuación 11.1 la ecuación que se considera en este estudio para calcular la curva de *TCO*.

$$\begin{aligned}
 TCO = & C_{bus} + C_{bat} + C_{car} + C_{ter} + C_{cap} \\
 & + \left(\sum_{i=1}^N \frac{Ce_i}{(1+r)^i} + \frac{Cs_i}{(1+r)^i} + \frac{Cm_i}{(1+r)^i} + \frac{Camb_i}{(1+r)^i} + \frac{Ch_i}{(1+r)^i} + \right) - \frac{Vr_{bat}}{(1+r)^N} \\
 & - \frac{Vr_{bus}}{(1+r)^N} \quad (11.1)
 \end{aligned}$$

Los parámetros representan:

- C_{bus} : Costo de compra del bus
- C_{bat} : Costo de compra de las baterías
- C_{car} : Costo de compra de los cargadores
- C_{ter} : Costo de compra del terminal
- C_{cap} : Costo de capacitación
- Cs : Costo
- Ce : Costo de la energía
- Cm : Costo del mantenimiento
- $Camb$: Costo ambientales
- Ch : Costos de salud
- Vr_{bat} : Valor residual de las baterías
- Vr_{bus} : Valor residual del bus

En el siguiente capítulo se presentan los resultados del *TCO* y una discusión general de los resultados.

12. Resultados TCO

En este capítulo se presenta el resultado final de la curva de *TCO* modelada con asistencia de los algoritmos de inteligencia artificial y con los resultados de emisiones obtenidos del *LCA*. Para calcular el *TCO* se hace uso de los datos de costos de manufactura/adquisición, emisiones, fase de uso y fin de vida útil vistos en los capítulos 10 y 11. Las fases de manufactura y fin de vida útil son estáticas, es decir, son datos que no dependen de las condiciones de operación, mientras que la fase de uso depende de las condiciones de operación y es necesaria su modelación. En este capítulo se presenta una breve descripción de cómo se modeló la fase de uso de las flotas de buses para la obtención de los consumos de energía de las tecnologías, añadiendo algunas consideraciones que se tomaron en cuenta, y se exponen los *TCO* calculados para distintos escenarios de operación.

12.1. Proceso de simulación de fase de uso

La simulación está compuesta de dos partes principales. La primera son los algoritmos de *IA* que nos permiten obtener el consumo de combustible o estado de carga de los buses en operación, y la segunda un algoritmo que permite generar escenarios de conducción. Para realizar este segundo algoritmo se deben tener consideraciones operativas, estas son que por día se considerará que ambos buses recorren aproximadamente 200 km y segundo, que la vida útil de ambas tecnologías es de 8 años, este último corresponde a un supuesto del modelo, que se basa en el recorrido diario indicado por los operadores y la vida útil del fabricante. Para generar estos escenarios de conducción se utilizan los datos recopilados por el Centro de Energía de la Universidad de Chile. Estos datos se obtienen de la operación de buses en la Región Metropolitana, guardándose en una matriz los perfiles de conducción que corresponden a las secuencias temporales de velocidad de los buses y que se utilizan en los algoritmos de *IA* para predecir el consumo como se vio en el capítulo 9. En total se obtienen cerca de 40 Gb de datos recopilados.

En las siguientes figuras, se ven dos ejemplos de ruta, perfil de conducción y consumo tanto para el caso de un bus diésel como eléctrico.

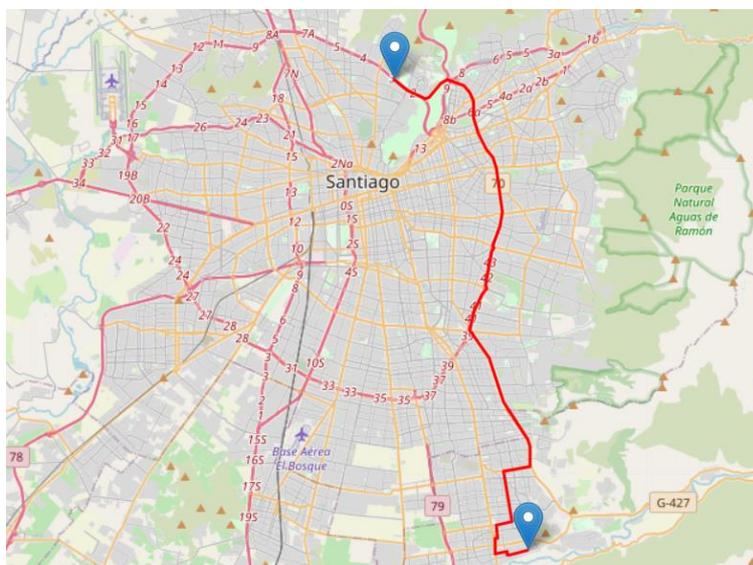


Figura 12.1 Recorrido de un bus diésel en la Región Metropolitana.

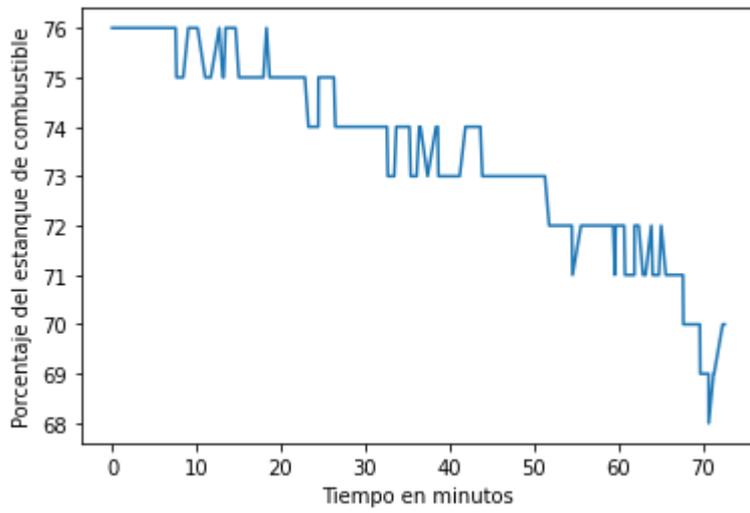


Figura 12.2: Consumo de combustible para el recorrido señalado en la figura 12.1.

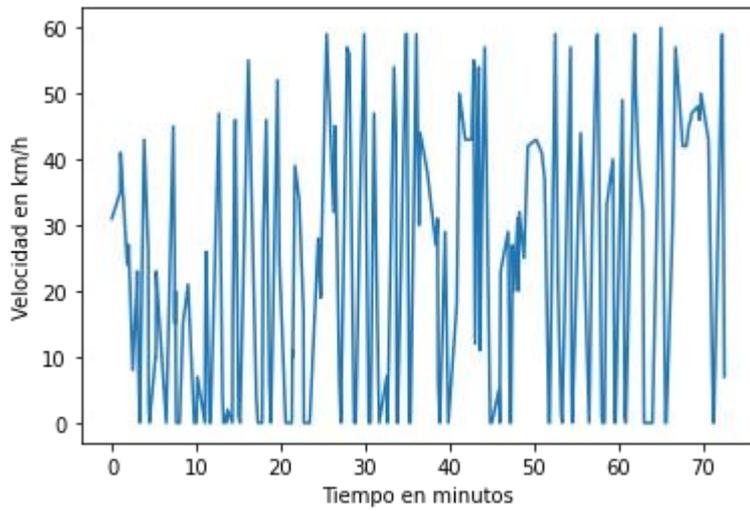


Figura 12.3: Perfil de conducción para el recorrido señalado en la figura 12.1.

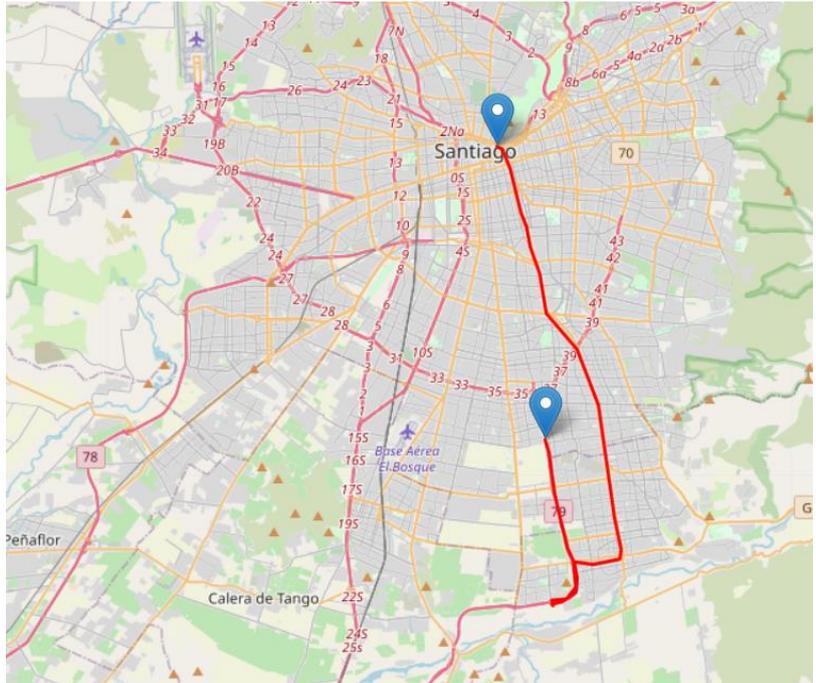


Figura 12.4 Recorrido de un bus eléctrico en la Región Metropolitana.

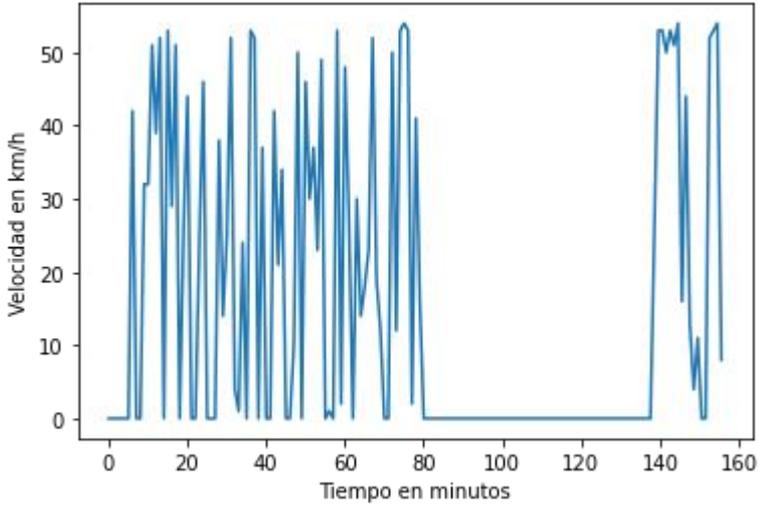


Figura 12.5: Perfil de conducción para el recorrido señalado en la figura 12.4.

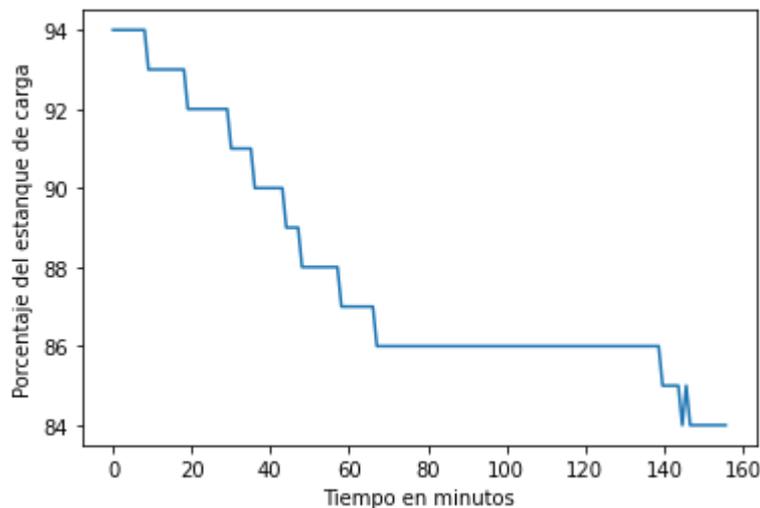


Figura 12.6: Consumo de energía para el recorrido señalado en la figura 12.4

De forma aleatoria estos perfiles de conducción son seleccionados desde la matriz que los contiene y mediante los algoritmos de IA se calcula la energía ocupada para realizarlos. Como restricción se tiene que la suma total de km calculados al día sea mayor a 180 km y menor que 220 km¹⁴. Toda la información calculada se guarda en una matriz con los km recorridos y el consumo de energía diario y se calculan con estos los costos ambientales y de operación vistos en el capítulo 11. Se itera 20 veces este procedimiento, por cada tecnología y se obtienen los valores promedio de consumo de energía¹⁵.

12.2. Resultados de TCO

Una vez terminado de modelar, se calculó que la eficiencia energética de una flota diésel operando en la Región Metropolitana es en promedio 0.56 Litros de diésel/km. Para poder convertir litros de diésel a la unidad internacional de energía, se multiplica por su poder calorífico inferior que corresponde a la cantidad de energía por unidad de masa de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación (como por ejemplo la combustión en un pistón). Para el caso del diésel es de aproximadamente 9.5 kWh/Litro, lo que da por tanto una eficiencia de 5.32 kWh/km. Con respecto a la flota eléctrica, esta posee una eficiencia promedio de 1.416 kWh/km, por lo que se puede concluir que en líneas generales un bus eléctrico es más eficiente energéticamente que un diésel.

Con respecto a los costos de la propiedad o *TCO* para las flotas eléctricas se tiene 1'349'047.66 USD o normalizado por kilómetro recorrido. 2.310 USD/km. En la publicación de Göhlich, D., Fay, T. A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., & Zhang, X. (2018), [35], se considera un *TCO* de 1.8 €/km o 2.12 USD/km, valor que es de similar magnitud que el obtenido, por lo que el modelo de *TCO* generado se considerará como validado.

Con respecto a los costos de propiedad para las flotas diésel estos corresponden a 1'593'219.1 USD o normalizado por kilómetro recorrido 2.728 USD/km, lo que implica que las flotas eléctricas son

¹⁴ Esta restricción es introducida para asegurar la existencia de rutas que puedan cumplir con el intervalo deseado.

¹⁵ Por confidencialidad exigida por parte de los operadores de la Región Metropolitana de Chile, la información del proceso de modelado es de carácter reservado, como, por ejemplo, marca de los buses, tamaño del estanco, tamaño de las baterías, etc.

generalmente más rentables que las flotas diésel. Esta diferencia no es tan elevada como originalmente se pensaba, esto se debe a que se están considerando los costos de terminales de carga para las flotas eléctricas bajo el supuesto de que están entrando las primeras flotas al país. En la siguiente sección se presentan varias curvas de *TCO* con distintos escenarios para hacer un análisis de sensibilidad.

12.3. TCO con sensibilidad de escenarios

A continuación, se presenta una serie de *TCO* con variaciones de escenarios posibles. Estos escenarios consideran variaciones de tasas de descuento, disminución de costos de la tecnología eléctrica y modificación de la matriz energética contemplando la exigencia de la licitación de transporte público de suministro 100% renovable.

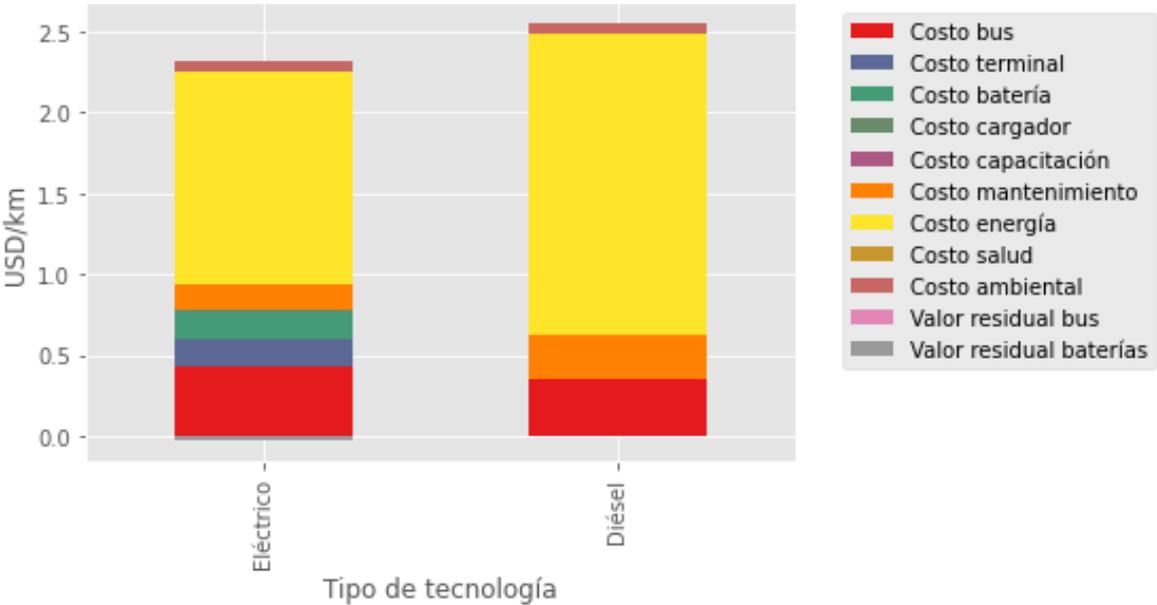


Figura 12.7: *TCO* con tasa de descuento social del 10%.

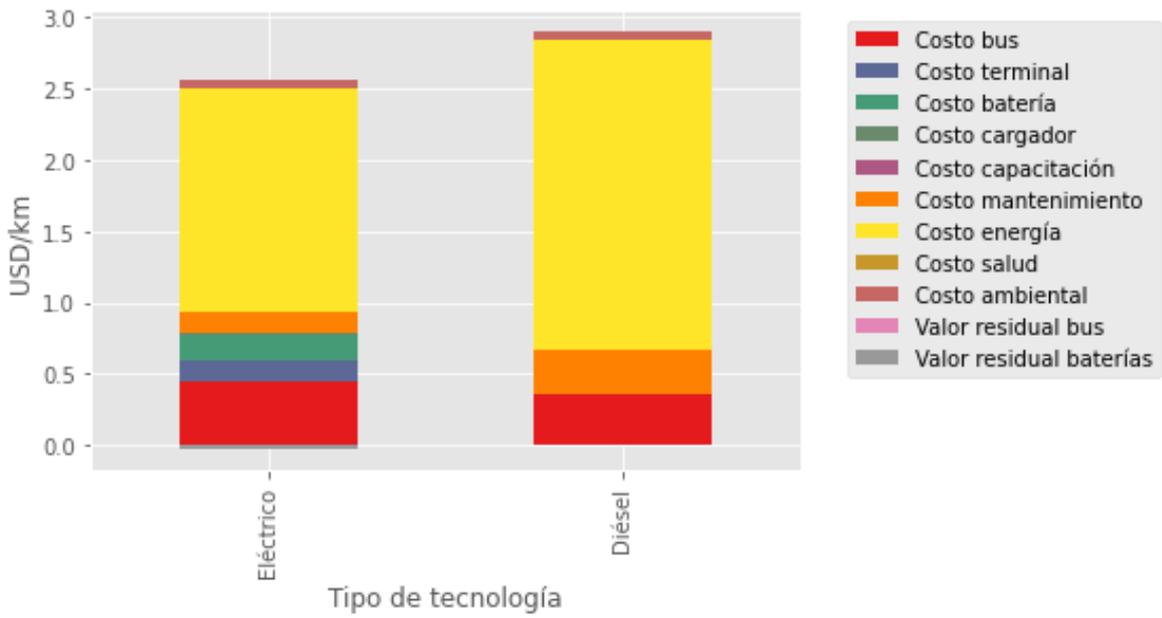


Figura 12.8: TCO con tasa de descuento social del 6%.

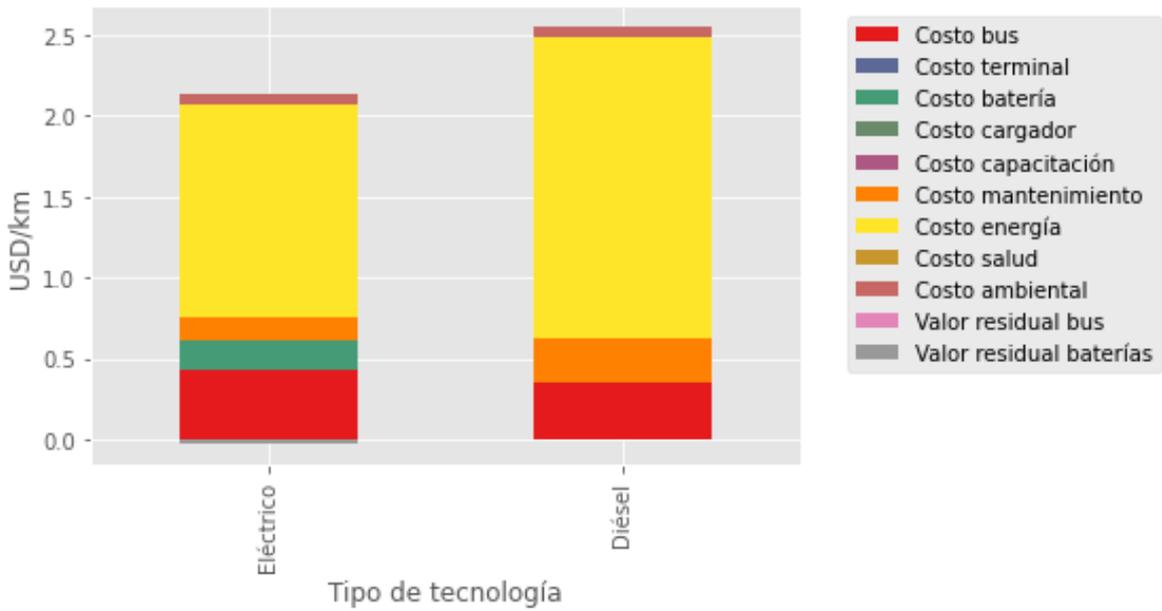


Figura 12.9: TCO considerando que los costos de entrada (terminal con estaciones de carga y capacitaciones es cero).

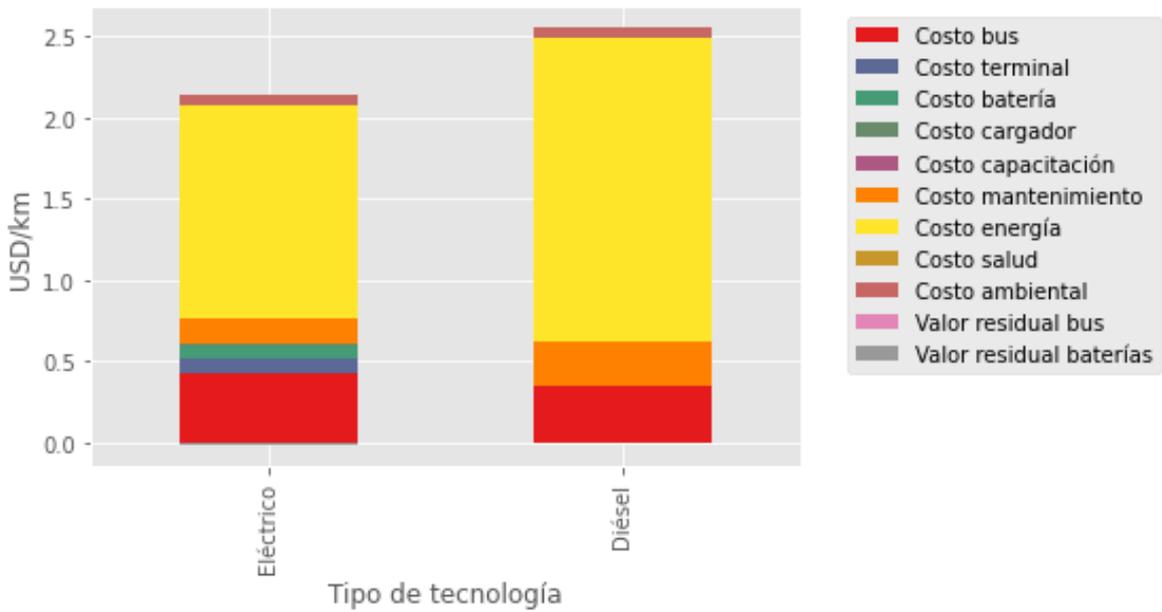


Figura 12.10: TCO considerando que los costos de la batería, terminal eléctrico y cargador bajan a la mitad.

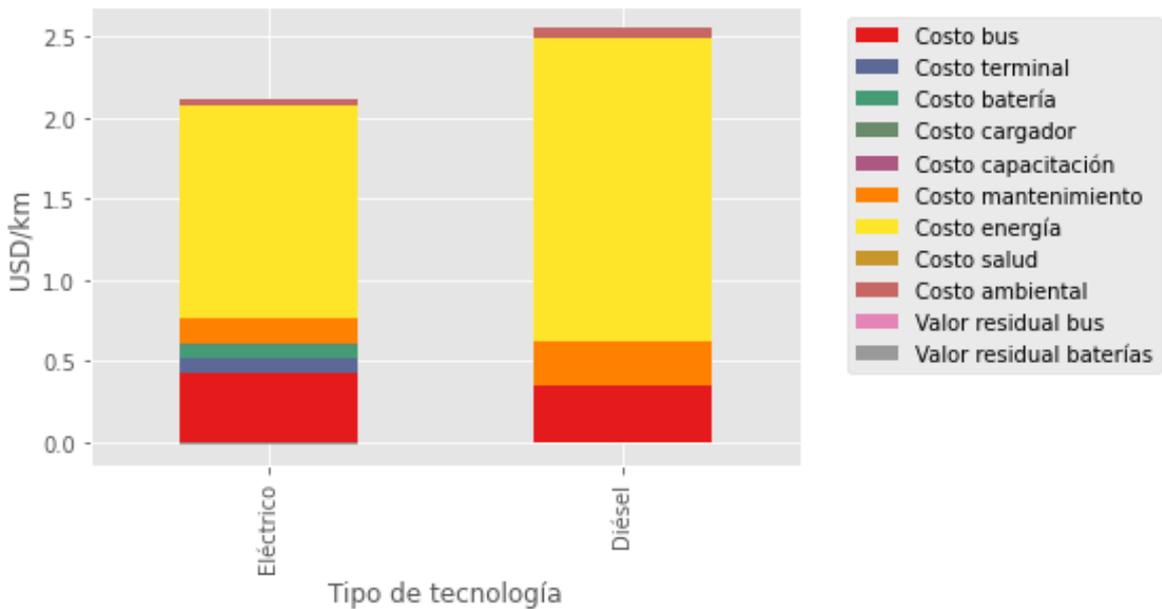


Figura 12.11: TCO considerando que los costos de la batería, terminal eléctrico y cargador bajan a la mitad y que el contrato de suministro eléctrico es 100% renovable.

Al observar los distintos escenarios de TCO generados, se puede identificar que las flotas eléctricas presentan una ventaja competitiva del punto de vista económico. La principal ventaja competitiva que tiene una flota eléctrica, es en su fase de uso, pues sus costos de operación y mantenimiento son menores que los de una flota diésel. Los costos son menores en términos de operación y de mantenimiento. Los costos operacionales son menores porque el costo de la energía eléctrica es

menor comparativamente al costo del diésel. Así también, son menores los costos de mantenimiento debido a que el tren motriz eléctrico presenta menos cantidad de piezas mecánicas y utiliza menor cantidad de lubricantes, y por ende presenta menos fallas mecánicas. En adición, con la masificación de los vehículos eléctricos, se espera, a futuro, una disminución de costos de inversión debido a la disminución proyectada del costo de la batería, así como de los terminales de carga y servicios relacionados como capacitaciones y mantenciones.

13. Conclusiones y trabajo futuro

Los resultados de *LCA* y *LCC* indican que las flotas de buses eléctricos, bajo la condición suministro eléctrico 100% renovable, son menos contaminantes y presentan menor costo total de propiedad que las flotas de buses diésel. Por lo cual, la inclusión de buses eléctricos en el sistema de transporte público junto con la transición energética hacia una matriz más limpia, son acciones claves en las que se está trabajando en Chile para la descarbonización del país.

La comparación de emisiones de CO_2 y $PM_{2,5}$ generadas por cada tecnología a lo largo de su ciclo de vida presenta distintos resultados para las distintas fases del ciclo de vida como se puede apreciar en el capítulo 11. Particularmente, considerando la totalidad del ciclo de vida y un suministro eléctrico en base a la matriz energética actual de los países donde se manufacturan los vehículos y la matriz actual de Chile para la fase de uso, los buses diésel generan menos emisiones de CO_2 que los eléctricos. Esta diferencia en generación de emisiones CO_2 se debe principalmente a la dependencia de las emisiones, en las fases de manufactura y uso, de las matrices energéticas. Sin embargo, y considerando que no se tiene injerencia en la etapa de manufactura, pero sí sobre la fase de uso, los resultados se invierten. Si se considera el requisito indicado en la licitación de transporte público, donde se establece que los contratos de suministro de energía deben ser 100% renovables y la actual transición energética de Chile, entonces, los buses eléctricos son menos contaminantes. Bajo este escenario los buses eléctricos en su fase de uso generan emisiones menores a una cuarta parte de las emisiones de buses diésel. En general, las emisiones de los buses eléctricos, al depender directamente de la matriz energética del país, poseen un mayor potencial de mejora durante la fase de uso del ciclo de vida del activo. Por lo anterior, y desde el punto de vista de la salud humana y del medioambiente, es recomendable promover la incorporación de flotas eléctricas en el transporte público.

El *TCO* resultante del *LCA* permite la comparación en términos de costos de las tecnologías de buses. Las flotas eléctricas presentan un menor *TCO* que los buses diésel. Este menor costo se debe a que son más eficientes desde el punto de vista energético, y a su menor costo de mantención. Estos menores costos de mantención derivan de una menor utilización de lubricantes y menores fallas mecánicas a causa de las diferencias de tren motriz. Por lo anterior, la fase de operación de flotas eléctricas es mucho más competitiva, económicamente, en comparación con las flotas de tecnología diésel. Y pese a que las flotas eléctricas poseen un mayor costo de adquisición, su fase de uso las hace más rentables, en el largo plazo, en comparación con las flotas diésel. En consecuencia, y considerando la proyección de disminución de los costos de inversión de las tecnologías de flotas eléctricas en de los próximos años, es recomendable, económicamente, impulsar el uso de buses eléctricos por sobre buses diésel.

A futuro se puede realizar un análisis posterior a este estudio, extrapolando los resultados de comparación de buses a vehículos de otras dimensiones. Esta extrapolación es posible debido la unidad funcional utilizada (100 a 200km de uso de flota). Para la extrapolación se debe tener precaución de los supuestos a utilizar, en particular de los porcentajes máxicos para las fases de manufactura y fin de ciclo de vida, y los rendimientos para la fase de uso. Es posible asumir que la composición másica porcentual es similar entre vehículos pesados y livianos, pero es necesario actualizar el rendimiento por km recorrido, pues un vehículo liviano presenta mejor rendimiento (en términos de uso de combustible) que un vehículo pesado. Los supuestos a considerar dependerán del enfoque del análisis, pues también es posible variar el tipo de rendimiento a utilizar considerando la cantidad de pasajeros, ya que un bus permite transportar mayor cantidad de pasajeros que un vehículo liviano.

Por último, se proponen algunas alternativas de mejoras al estudio como trabajo futuro: estudiar cómo se ve afectado el rendimiento de las flotas por la degradación del banco de baterías; el uso de datos empíricos en Chile para las fases de manufactura y fin de vida útil; profundizar que se hace en Chile con los lubricantes retirados de los motores cada ciertos km; probar nuevos algoritmos de tipo bayesianos que puedan dar una estimación del error en la predicción; y considerar otras tecnologías como bio-combustibles, combustibles sintéticos y/o hidrógeno.

Bibliografía

- [1] Rhodes, C. J. (2016). The 2015 Paris climate change conference: COP21. *Science progress*, 99(1), 97-104.
- [2] Samaras, C., & Meisterling, K. (2008). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy.
- [3] Dér, Antal, et al. "Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Fleet Applications." *Fleets Go Green*. Springer, Cham, 2018. 61-80.
- [4] Chen, J. L., & Liaw, C. W. (2001, December). A simple life cycle assessment method for green product conceptual design. In *Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* (pp. 775-780). IEEE.
- [5] Bartolozzi, I., Rizzi, F., & Frey, M. (2013). Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy. *Applied energy*, 101, 103-111.
- [6] Ivanov, O. L., Honfi, D., & Stripple, H. (2018). Uncertainty and variation in LCA-Implementation of probabilistic methods to assess environmental impacts of infrastructures.
- [7] McCleese, D. L., & LaPuma, P. T. (2002). Using Monte Carlo simulation in life cycle assessment for electric and internal combustion vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(4), 230-236.
- [8] Wu, J. D., & Liu, J. C. (2012). A forecasting system for car fuel consumption using a radial basis function neural network. *Expert Systems with Applications*, 39(2), 1883-1888.
- [9] Lamana, N. R., & Aja, A. H. (2010). Análisis del ciclo de vida
- [10] Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlenius, J. (2010). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles—Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1519-1529.
- [11] Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53-64.
- [12] Cooney, G., Hawkins, T. R., & Marriott, J. (2013). Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses. *Journal of Industrial Ecology*, 17(5), 689-699.
- [13] Helmers, E., Dietz, J., & Weiss, M. (2020). Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. *Sustainability*, 12(3), 1241.
- [14] Casals, L. C., García, B. A., Aguesse, F., & Iturrondobeitia, A. (2017). Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 82-93.

- [15] Nordelöf, A., Romare, M., & Tivander, J. (2019). Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 211-222.
- [16] Bi, Z., De Kleine, R., & Keoleian, G. A. (2017). Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plug-in versus Wireless Charging for an Electric Bus System. *Journal of Industrial Ecology*, 21(2), 344-355.
- [17] Potkány, M., Hlatká, M., Debnár, M., & Hanzl, J. (2018). Comparison of the lifecycle cost structure of electric and diesel buses. *NAŠE MORE: znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo*, 65(4 Special issue), 270-275.
- [18] Skansi, S. (2018). *Introduction to Deep Learning: from logical calculus to artificial intelligence*. Springer.
- [19] Goodfellow, Ian; Bengio, Yoshua; Courville, Aaron (2016). *Deep Learning*. MIT Press. pp. 200–220. ISBN 9780262035613.
- [20] Aggarwal, C. C. (2018). *Neural networks and deep learning*. Springer, 10, 978-3
- [21] Wong, Y. S., Lu, W. F., & Wang, Z. (2010). Life cycle cost analysis of different vehicle technologies in Singapore. *World electric vehicle journal*, 4(4), 912-920.
- [22] Crist, P. (2012). Electric vehicles revisited: costs, subsidies and prospects. *International Transport Forum Discussion Paper*.
- [23] Kara, S., Li, W., & Sadjiva, N. (2017). Life cycle cost analysis of electrical vehicles in Australia. *Procedia CIRP*, 61, 767-772.
- [24] Zahid, T., Xu, K., Li, W., Li, C., & Li, H. (2018). State of charge estimation for electric vehicle power battery using advanced machine learning algorithm under diversified drive cycles. *Energy*, 162, 871-882.
- [25] Del Duce, A., Gauch, M., & Althaus, H. J. (2016). Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1314-1326.
- [26] Singh, M. K. (1980). *Environmental assessment of the US Department of Energy electric and hybrid vehicle program*. The Laboratory.
- [27] Yang, Z., Deng, B., Deng, M., & Sun, G. (2018). A study on finite element analysis of electric bus frame for lightweight design. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 175, p. 03049). EDP Sciences.
- [28] Helmers, E., Dietz, J., & Weiss, M. (2020). Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. *Sustainability*, 12(3), 1241.
- [29] Quarles, N., Kockelman, K. M., & Mohamed, M. (2020). Costs and Benefits of Electrifying and Automating Bus Transit Fleets. *Sustainability*, 12(10), 3977.

- [30] Asociación de generadoras de Chile. Reporte Anual 2019. <http://generadoras.cl/documentos/reportes-anales/reporte-anual-2019>.
- [31] DELFT, T. (2017). The Model of the Eco-costs/Value Ratio.
- [32] Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019). Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, 5(6), e01866.
- [33] McKenzie, E. C., & Durango-Cohen, P. L. (2012). Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 39-47.
- [34] Narins, T. P. (2017). The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry. *The Extractive Industries and Society*, 4(2), 321-328.
- [35] Göhlich, D., Fay, T. A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., & Zhang, X. (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4.
- [36] Quarles, N., Kockelman, K. M., & Mohamed, M. (2020). Costs and Benefits of Electrifying and Automating Bus Transit Fleets. *Sustainability*, 12(10), 3977.

Anexo A: Encuesta a operadores de flotas eléctricas

En este anexo se presentan las preguntas realizadas a los operadores de flotas eléctricas de buses en la Región Metropolitana.

Las preguntas que se presentan a continuación pueden tener opciones (Listadas alfabéticamente) cuyo propósito es ayudar a guiar la respuesta final, estas opciones no son excluyentes, es decir, puede usar más de una. Por otro lado, hay preguntas que requieren un formato de respuesta específico el cual se especifica mediante *.

1. ¿Qué les motivó para traer buses eléctricos a Chile?
 - a. La protección del medio ambiente
 - b. La protección de la salud
 - c. Publicidad y marketing
 - d. Ventajas económicas

2. ¿Cuánto tiempo le tomó el proceso desde la compra del bus eléctrico hasta su llegada a Santiago? ¿Cuánto tiempo comparado con un bus diésel?

* Indique el tiempo en días o meses desde que se emitió la orden de compra hasta que llegó el bus a su terminal.

3. ¿Cómo fue el trayecto?

* Indique el lugar de procedencia de su bus eléctrico, la ruta marítima que siguió (aproximada) y la ruta terrestre hasta llegar a su terminal. Y lo mismo para sus buses diésel.

4. ¿Cuál fue el costo de compra en USD de un bus eléctrico? ¿Cuál fue el costo de compra en USD de un bus diésel?

* Indique solo dos cifras significativas solamente. Para el bus diésel indique además el año de referencia.

5. ¿Cuánto tiempo tardó en operar el bus eléctrico una vez llegado a Santiago?

* Indique días, semanas aproximadamente.

6. ¿Qué otros accesorios compraron para poder operar buses eléctricos en Santiago?

*Por favor indique además el precio aproximado en USD.

7. ¿Necesitó de la contratación externa de algún servicio para poder comenzar a operar los buses?
 - a. Si /Si responde que si indique precio aproximado en USD.
 - b. No

8. ¿Cómo tomaron sus conductores este cambio de tecnología?
 - a. Con mucho entusiasmo
 - b. Con algo de entusiasmo
 - c. Apatía

- d. Con algo de preocupación
 - e. Con mucha preocupación
9. ¿Cuánto tiempo necesitó para que sus conductores pudieran operar un bus eléctrico?
- a. 2 meses
 - b. 1 mes
 - c. 3 semanas o menos
 - d. 3 meses o más
10. ¿Cuánto dinero invirtió en USD para capacitar a su personal para el uso de buses eléctricos?
11. ¿Qué otros profesionales además de los conductores requirieron contratar para operar los buses eléctricos?
- *Por favor indique además si existe alguna diferencia con los buses diésel.
12. ¿De dónde proviene la energía que utilizan sus buses eléctricos?
- * Indique precio aproximado del kWh en USD
- a. Con contrato con la red eléctrica convencional
 - b. Con contrato con algún proveedor
 - c. Con contrato con alguna planta productora
 - d. Dispone de sus propias fuentes, solar, eólica etc.
13. ¿Cómo es un día típico de operación del bus eléctrico?
- * Indique qué terminal sale, cuál es su recorrido, cuántas veces lo cargan al día
14. ¿Cómo es un día típico de operación del bus diésel?
- * Indique qué terminal sale, cuál es su recorrido, cuántas veces al día le cargan su tanque.
15. ¿Cuál es la cantidad de pasajeros por hora, bus y ruta?
16. ¿Ha notado alguna diferencia en el flujo de pasajeros con respecto a los buses diésel?
- a. Son los mismos
 - b. Hay ligeramente más en los buses diésel.
 - c. Hay ligeramente más en los buses eléctricos.
17. ¿Ha notado alguna diferencia en la evasión del pago del pasaje entre un bus diésel y uno eléctrico, desde que comenzaron a operar los buses eléctricos?
18. ¿Cada cuánto tiempo debe hacerle mantenimiento a un bus eléctrico? ¿Qué piezas debe reemplazar? ¿Contrató a alguna empresa externa para realizarlo? ¿Cuánto tiempo el bus está parado? ¿Cuánto dinero le cuesta este mantenimiento? ¿Ha identificado alguna discordancia positiva o negativa entre la operación real y lo señalado en el manual?

* Indique cada cuántos km realiza la mantención, qué piezas cambia y su costo aproximado, cuánto tiempo en días o semanas el bus esta fuera de servicio y si lo señalado por su manual de usuario es correcto.

19. Indique la misma información anterior, pero para los buses diésel

* Indique cada cuántos km realiza la mantención, qué piezas cambia y su costo aproximado, cuánto tiempo en días o semanas el bus esta fuera de servicio y si lo señalado por su manual de usuario es correcto.

20. ¿Cada cuánto tiempo debe hacer mantenimiento a los equipos externos necesarios para operar buses eléctricos, por ejemplo, cargadores? ¿Cuánto tiempo le toma? ¿Interfiere este proceso en la salida a terreno de los buses? ¿Cuánto dinero le cuesta? Y si ¿Contrata a alguna empresa externa?

21. ¿Usted percibe que su empresa haya ganado más notoriedad mediática por el uso de buses eléctricos?

- a. Si.
- b. Indiferente.
- c. No.

22. ¿Cuál es la vida útil de un bus eléctrico según lo informa su manual de usuario?

- a. Menos de 10 años
- b. Entre 10 y 15 años
- c. Entre 15 años y 20 años
- d. Más de 20 años

23. ¿Cuál es la vida útil de un bus diésel según lo informa su manual de usuario?

- a. Menos de 10 años
- b. Entre 10 y 15 años
- c. Entre 15 años y 20 años
- d. Más de 20 años

24. ¿Considera que la degradación del banco de baterías es acelerada, normal, o lenta, considerando la vida útil que supuestamente debiesen tener?

25. ¿Con el paso del tiempo ha disminuido el estado de carga (SOC) final de sus buses al finalizar su recorrido? Por ejemplo, al inicio llegaban al final con un 20% y ahora con un 15% al final de su recorrido.

- a. Si. Ha disminuido más del 10% desde que fueron puestos los buses en operación
- b. Si. Ha disminuido entre un 10% a un 5% desde que fueron puestos los buses en operación
- c. Si. Pero menos del 5%
- d. No ha disminuido

26. ¿Cuál es su estrategia de reciclaje para los buses diésel?
- Contratar una empresa externa / Indique el pago que realiza.
 - Vende los buses a otra empresa
 - Vende los componentes como chatarra
27. ¿Cuál es su estrategia para el manejo de residuos al final de la vida útil del bus eléctrico?
- Si tenemos y es...
 - No tenemos y por ahora no estamos interesados.
 - No tenemos y nos interesa saber cómo realizarlo.
28. Indique que beneficios le ha dado el estado de Chile por el uso de buses eléctricos.
- Subsidios
 - beneficios tributarios
 - Ninguno
29. ¿Hay algún requerimiento que le gustaría hacer al gobierno de Chile?
30. ¿Desea en el futuro se le compartan los resultados del estudio?

Anexo B: Tablas de LCA

Tabla B.1: LCA habitáculo - kg de emisiones equivalentes por porcentaje másico.

Material	Fuente	%	kg SOx eq	kg P eq	kg Cu eq	kg Benzopireno eq	kg NO _x eq	kg PM _{2.5} eq	kg CO ₂ eq
Acero	Idematapp2020 Steel	54.2	17.1287611	18.7763841	0.039216839	0.01970882	28.7206921	0	11874.3233
Hierro	Materials, metals, ferro, cast irons	7.9	1.60043499	-0.83519889	0.002206836	0.00095046	2.27196513	0.01035271	1139.53552
Aluminio	Idematapp2020 AlCuMg1 (2017)	11.9	41.8115761	3.3234298	0.156371339	0.00570804	15.4956744	0.60326581	0
Plástico	Idematapp2020 PLA (Polylactide, biodegradable)	9.2	17.917	1.99272	0	0	3.0187523	0	3452.3
Compuesto	Idematapp2020 Lead (primary)	1	3.44216714	0.01267671	0.001354536	9.7191E-05	0.80098845	0.01078655	179.922973
Otros	Idematapp2020 Cu	15.8	222.076089	99.8352535	2.527268311	0.09102276	54.466054	2.05351407	4507.31965

Tabla B.2: LCA Tren de poder diésel - kg de emisiones equivalentes por porcentaje másico.

Material	Fuente	%	kg SOx eq	kg P eq	kg Cu eq	kg Benzopireno eq	kg NO _x eq	kg PM _{2.5} eq	kg CO ₂ eq
Acero	Idematapp2020 Steel	59.4	4.94002917	5.41521275	0.011310353	0.00568413	8.283206	0	3424.62033
Hierro	Materials, metals, ferro, cast irons	7.9	0.4211671	-0.21978918	0.000580746	0.00025012	0.59788556	0.0027244	299.877769
Aluminio	Idematapp2020 AlCuMg1 (2017)	1.7	1.57186376	0.12494097	0.005878622	0.00021459	0.58254415	0.02267917	0
Plástico	Idematapp2020 PLA (Polylactide, biodegradable)	10.1	5.17625	0.5757	0	0	0.87212238	0	997.375
Compuesto	Idematapp2020 Lead (primary)	1	0.90583346	0.00333598	0.000356457	2.5576E-05	0.21078643	0.00283857	47.3481509
Otros	Idematapp2020 Cu	2.2	8.13736503	3.65818717	0.092604768	0.00333528	1.99575814	0.07524535	165.158281

Tabla B.3: LCA Tren de poder Eléctrico - kg de emisiones equivalentes por porcentaje másico.

Material	Fuente	%	kg SOx eq	kg P eq	kg Cu eq	kg Benzopireno eq	kg NO _x eq	kg PM _{2.5} eq	kg CO ₂ eq
Acero	Idematapp2020 Steel	45.2	5.26271121	5.76893372	0.012049143	0.00605542	8.8242639	0	3648.31607
Hierro	Idematapp2020 AlCuMg1 (2017)	27.9	36.1158815	2.87070252	0.13506998	0.00493048	13.3848085	0.52108718	0
No ferrosos	Idematapp2020 Cu	12.3	63.6933754	28.6336287	0.724842777	0.02610613	15.6213433	0.58896589	1292.73891
Plástico	Idematapp2020 PLA (Polylactide, biodegradable)	4.9	3.51575	0.39102	0	0	0.59235243	0	677.425
Electrónicos	Idematapp2020 PCB = Printed Circuit Board (including ICs)	1.9	36.9463649	4.71154095	0.255290684	0.00776617	34.6848129	2.72380599	8648.89484
Otros	Idematapp2020 Plywood, outdoor use	7.8	1.16182257	0.00332363	0.001172075	8.1803E-06	0.45180713	0.00771982	184.521319
Baterías	Idematapp2020 Lithium-ion LiFePO4 battery (118 Wh per kg)							11.7416646	103178.062

Tabla B.4: LCA Tren de poder Eléctrico según proceso de manufactura- kg de emisiones equivalentes por porcentaje másico.

Proceso de manufactura	%	kg SOx eq	kg P eq	kg Cu eq	kg Benzopireno eq	kg NO _x eq	kg PM _{2.5} eq	kg CO ₂ eq
Laminado de hojas, acero	54.2	5.20899011	0.33499202	0.01286068	0.07393929	1.21725731	0.44485903	1836.30625
Laminado de chapa, aluminio	7.9	1.63140525	0.01686993	0.00021327	0.00054708	0.10222921	0.0478885	680.392043
Trefilado	11.9	5.65879827	2.36119392	0.0048401	0.00308232	0.99094945	0.40158857	544.154516
Trabajo de metal promedio	9.2	6.70733616	1.62277246	0.00827091	0.02867956	0.69366681	0.57120616	1628.84528
Moldeo por inyección	1	1.03759568	0.00908495	1.0198E-10	4.6314E-11	5.2412E-08	8.6102E-09	30.9570079
Templado de vidrio	15.8	1.4007707	0.0340367	0.00013257	0.00040956	0.11479315	0.0442513	352.052509
Agua del grifo	1	4.8002E-05	3.3548E-06	3.8726E-08	1.8904E-07	1.0232E-05	3.7156E-06	0.01582588

Tabla B.5: LCA Tren de poder Eléctrico fase de uso - kg de emisiones equivalentes por MJ.

Generación eléctrica	%	kg SO _x eq	kg P eq	kg Cu eq	kg Benzopireno eq	kg NO _x eq	kg PM _{2.5} eq	kg CO ₂ eq
Base Carbón / US	36.7	0.001539497	5.97454E-05	1.23923E-07	3.44775E-07	3.355E-05	1.25778E-05	0.33080889
Gas natural / CENTREL	18.2	0.000273429	3.582E-06	1.92505E-08	9.91595E-08	0.00011309	3.27251E-06	0.254057501
Petróleo / NL	0.9	0.000461066	2.63627E-05	1.49639E-07	1.18235E-07	6.63367E-05	1.34284E-05	0.197675307
Hidroeléctrica de pasada / RER	14	2.98743E-06	1.42952E-07	3.94154E-09	2.2663E-08	7.11453E-07	8.41601E-07	0.001029291
Hidroeléctrica de embalse /FI	12.9	3.74915E-06	1.7705E-07	4.35808E-09	2.42996E-08	7.69894E-07	7.45198E-07	0.010234965
Cogeneración / RER	0.2	7.18498E-05	1.24495E-06	8.07111E-09	4.06251E-08	3.02936E-05	1.63528E-06	0.11811349
Biomasa / CH	2.4	6.73976E-05	2.90399E-06	3.64455E-08	3.90939E-08	1.14851E-05	3.87822E-06	0.010595294
Eólica / RER	6.2	1.05526E-05	1.26431E-06	2.95333E-08	1.55995E-07	1.99215E-06	1.89088E-06	0.003107802
Fotovoltaica / DE	8.2	8.48098E-05	1.45567E-05	1.77536E-07	1.69074E-07	2.57134E-05	5.40965E-06	0.024059445
Geotermia /Islandia	0.3	2.98165E-06	2.93578E-07	0.017866972	4.17431E-10	2.79817E-06	5.80275E-07	0.003899083

Se utiliza base de datos ecoinvent 2012 y seleccionan fuentes y datos de países con porcentaje de generación del recurso el 2012 similar a la chilena 2019. Se utiliza base de datos de "Our world in data": <https://ourworldindata.org/grapher/world-electricity-by-source?tab=chart&time=earliest..latest®ion=World>.



Es un Programa de:

Ejecutado por:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE**



calac@swisscontact.org.pe
www.programacalac.com
Facebook: @CALACplus
Twitter: @Calacplus

Prolongación Arenales N°722, Miraflores
Lima 15074 – Perú
Teléfonos: +511 2641707, 2642547
Fax: +511 2643212
www.swisscontact.org