

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**SANTIAGO – CHILE**

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN FLOTA OPERATIVA DE UNA EMPRESA  
DE SERVICIOS BÁSICOS EN SANTIAGO DE CHILE

**GERMAIN ANTONIO QUINTANA CALDERA**  
**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: MAURICIO OSSES ALVARADO**  
**PROFESOR CORREFERENTE: CRISTIAN ACEVEDO**

**Diciembre 2019**

# CONTENIDO

---

|       |                                                                                      |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introducción .....                                                                   | 5  |
| 1.1   | Marco General .....                                                                  | 6  |
| 1.2   | Objetivos .....                                                                      | 7  |
| 2     | Estado del arte.....                                                                 | 8  |
| 2.1   | Vehículos Eléctricos.....                                                            | 8  |
| 2.1.1 | Historia y Actualidad .....                                                          | 8  |
| 2.1.2 | Partes y funcionamientos de los vehículos eléctricos .....                           | 11 |
| 2.1.3 | Ventajas, desventajas y desafíos .....                                               | 17 |
| 2.1.4 | Industria del auto eléctrico .....                                                   | 18 |
| 2.2   | Flotas comerciales .....                                                             | 19 |
| 2.2.1 | Tipos de flotas .....                                                                | 20 |
| 2.2.2 | Flotas comerciales eléctricas en Chile .....                                         | 21 |
| 2.2.3 | Flotas comerciales eléctricas en el extranjero.....                                  | 23 |
| 2.3   | Estudios de desempeño .....                                                          | 25 |
| 2.3.1 | Aspectos generales .....                                                             | 25 |
| 2.3.2 | Potencia específica vehicular .....                                                  | 26 |
| 2.3.3 | Energía .....                                                                        | 28 |
| 3     | Metodología.....                                                                     | 29 |
| 3.1   | Diseño de la campaña de medición .....                                               | 29 |
| 3.1.1 | Caracterización de la flota del Grupo Aguas .....                                    | 29 |
| 3.1.2 | Medición de la operación real .....                                                  | 30 |
| 3.1.3 | Equipos de medición, unidades VAM .....                                              | 31 |
| 3.2   | Procesamiento de los datos recolectados.....                                         | 32 |
| 3.3   | Entregas a la empresa Aguas Andinas. ....                                            | 33 |
| 4     | Resultados y Análisis.....                                                           | 34 |
| 4.1   | Caracterización de la flota.....                                                     | 34 |
| 4.1.1 | Proyecto de electro-movilidad Aguas Andinas.....                                     | 34 |
| 4.2   | Medición de la operación real de los vehículos .....                                 | 37 |
| 4.3   | Análisis del desempeño de los vehículos .....                                        | 38 |
| 4.3.1 | Análisis de caracterización de la flota de Aguas Andinas .....                       | 38 |
| 4.3.2 | Análisis estadístico sobre los datos registrados durante la campaña de medición..... | 41 |
| 4.3.3 | Análisis de los recorridos .....                                                     | 42 |

|       |                                          |    |
|-------|------------------------------------------|----|
| 4.3.4 | Análisis energético .....                | 44 |
| 4.3.5 | Análisis de emisiones contaminantes..... | 50 |
| 4.3.6 | Análisis económico .....                 | 55 |
| 5     | Conclusiones.....                        | 65 |
| 5.1   | Estado del arte .....                    | 65 |
| 5.2   | Metodología.....                         | 67 |
| 5.3   | Resultados y Análisis .....              | 67 |
| 5.4   | Recomendaciones.....                     | 69 |
| 6     | Bibliografía .....                       | 71 |

## FIGURAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Evolución parque mundial de vehículos eléctricos. (EVI, 2017) .....                                                                                                          | 10 |
| Figura 2. Escenarios de desarrollo de la cantidad de vehículos eléctricos. (EVI, 2017) .....                                                                                           | 10 |
| Figura 3. Comparación de características para distintos tipos de motores para tracción de EV de pasajeros. Fuente: “Prospección tecnológica en el sector energético”, MINEN 2018. .... | 14 |
| Figura 4. Variación del costo y la densidad de energía de las baterías (EVI, 2017). ....                                                                                               | 16 |
| Figura 5. Ventas de vehículos eléctricos, participación de mercado y participación de BEV y PHEV en los países EVI, de 2010 al 2016. (EVI, 2017).....                                  | 19 |
| Figura 6 Bus eléctrico municipal BYD k9 NAMA Zona Verde.....                                                                                                                           | 21 |
| Figura 7. Taxi eléctrico BYD e6 NAMA Zona Verde.....                                                                                                                                   | 22 |
| Figura 8. Vehículo operativo de Aguas Andinas, Renault Kangoo Z.E. ....                                                                                                                | 22 |
| Figura 9. Infografía de proyecto de camiones eléctricos CCU. ....                                                                                                                      | 23 |
| Figura 10. Ejemplos de la flota eléctrica de Le Groupe La Poste.....                                                                                                                   | 24 |
| Figura 11. Vehículo eléctrico Correios BYD T3 .....                                                                                                                                    | 25 |
| Figura 12. VAM Unit Vehicle Activitie Monitor (Izq.) y Antena GPS convencional (Der.).....                                                                                             | 32 |
| Figura 13. Interfaz del asistente para importar texto a una planilla Microsoft Excel .....                                                                                             | 32 |
| Figura 14. Cantidad de vehículos vigentes por año de fabricación. ....                                                                                                                 | 39 |
| Figura 15. Proporción de vehículos de la flota renting por clase. (elaboración propia) .....                                                                                           | 39 |
| Figura 16. Proporciones de los vehículos para licitar según categoría. ....                                                                                                            | 40 |
| Figura 17. Recorridos de los dos vehículos estudiados durante la campaña de medición año 2016. BEVA en rojo y ICVA en amarillo.....                                                    | 43 |
| Figura 18. Recorridos de los cuatro vehículos estudiados durante la campaña de medición año 2017. (BEV1 en celeste, BEV2 en verde y ICV2 en azul) .....                                | 43 |
| Figura 19. Perfil de velocidad de BEVA y ICVA el día 17/11/2016.....                                                                                                                   | 45 |
| Figura 20. Perfil de velocidad de BEV2 y ICV2 el día 10/10/2017. ....                                                                                                                  | 45 |
| Figura 21. Nube de velocidad y aceleración para el vehículo BEVA.....                                                                                                                  | 46 |
| Figura 22. Frecuencia bivariado velocidad y aceleración para los 4 vehículos medidos. ....                                                                                             | 47 |
| Figura 23. Altitud del recorrido del vehículo BEVA para todos los días de medición. ....                                                                                               | 48 |
| Figura 24. Potencia específica vehicular del vehículo BEVA. ....                                                                                                                       | 49 |
| Figura 25. Línea base y emisión de la Alternativa 2 para CO <sub>2</sub> de la flota de Aguas. ....                                                                                    | 51 |

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26. Línea base y emisión de la Alternativa 2 para NOx de la flota de Aguas. ....                                                                                                                    | 52 |
| Figura 27. Línea base y emisión de la Alternativa 2 para MP de la flota de Aguas. ....                                                                                                                     | 52 |
| Figura 28. Línea base y reducción de la Alternativa 2 de la huella de agua de la flota de Aguas. ....                                                                                                      | 53 |
| Figura 29. Comparación del costo operacional anual para un ICV y un BEV. Costo de operación anual desagregado en costo de energía y costo de leasing, para escenario realista, optimista y pesimista. .... | 57 |
| Figura 30. Diferencia en el costo de operación para un ICV y un BEV, para los 3 escenarios calculados. ....                                                                                                | 57 |
| Figura 31. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación. ....                                                                                                                                   | 59 |
| Figura 32. Costos de operación de los vehículos a licitar. ....                                                                                                                                            | 60 |
| Figura 33. Línea base y reducción de energía de la flota de Aguas. ....                                                                                                                                    | 63 |
| Figura 34. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación. ....                                                                                                                                   | 64 |

## TABLAS

---

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Tipos de baterías de ion-Litio comerciales y sus propiedades electroquímicas. Elaboración propia en base, fuente (Helbig, Bradshaw, Wietschel, Thorenz, & Tuma, 2018) ..... | 15 |
| Tabla 2. Identificación de los vehículos estudiados. ....                                                                                                                            | 30 |
| Tabla 3. Especificaciones técnicas Citroën E-Berlingo. Fuente: (Citroen, 2017) .....                                                                                                 | 37 |
| Tabla 4. Resultados de la medición de operación real. ....                                                                                                                           | 37 |
| Tabla 5. Distribución de vehículos de la flota del grupo aguas según su propiedad y la vigencia del contrato. (elaboración propia) .....                                             | 38 |
| Tabla 6. Nivel de actividad anual proyectado por categoría para los vehículos a licitar el 2018. ....                                                                                | 41 |
| Tabla 7. Revisión estadística de los datos registrados. ....                                                                                                                         | 42 |
| Tabla 8. Consumo de energía de los vehículos, eficiencia calculada y rendimiento real de los vehículos eléctricos. ....                                                              | 49 |
| Tabla 9. Proyección de entrada de furgones eléctricos 2017-2025. ....                                                                                                                | 50 |
| Tabla 10. Potencial de reducción de emisiones y huella del agua. Además, la variación sobre la línea base. ....                                                                      | 54 |
| Tabla 11. Equivalencia canchas de fútbol plantadas del potencial de reducción de las emisiones de CO <sub>2</sub> . ....                                                             | 54 |
| Tabla 12. Parámetros de costo de leasing operacional. ....                                                                                                                           | 56 |
| Tabla 13. Parámetros de costo de energía. ....                                                                                                                                       | 56 |
| Tabla 14. Número de vehículos por categoría y por plazos de contratación del contrato actual y las 2 alternativas para contratos 2018. ....                                          | 58 |
| Tabla 15. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación. ....                                                                                                              | 59 |
| Tabla 16. Sensibilidad del costo total de operación normalizado, según número de vehículos y costo leasing .....                                                                     | 61 |
| Tabla 17. Diferencia porcentual del costo total de operación normalizado entre el contrato actual y Alternativa 2. ....                                                              | 62 |

## GLOSARIO

---

ICV: Internal combustion vehicle, en español “vehículo de combustión interna”.

BEV: Battery electric vehicle, en español “vehículo eléctrico de baterías”.

PHEV: Plug-in hybrid electric vehicle, en español “vehículo eléctrico híbrido enchufable”.

VSP: Vehicle specific power, en español “potencia específica vehicular”.

VAM: Vehicle Activity Monitor, en español “monitor de actividad vehicular”.

EVI: Electric Vehicle Initiative.

IEA: International Energy Agency

SOC: State of charge, en español “estado de carga”.

DOD: Deep of discharge, en español “profundidad de descarga”.

OCV: Open circuit voltage, en español “voltaje en circuito abierto”.

CA: Corriente alterna.

CD: Corriente directa.

MTT: Ministerio de transportes y telecomunicaciones de Chile.

MMA: Ministerio de Medio Ambiente de Chile.

CO: Monóxido de carbono.

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono.

HC: Hidrocarburo.

NOX: Óxidos de nitrógeno.

MP: Material particulado.

GPS: Global Positioning System, en español Sistema de posicionamiento global.

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 MARCO GENERAL

En la necesidad de transportarse, el ser humano ha desarrollado nuevas tecnologías, como la invención de la rueda o de los aviones. La humanidad se movió por tierra sobre animales, y sobre el mar gracias al viento y las mareas, luego fue la máquina de vapor la que revolucionó los viajes de largas distancias con trenes y barcos capaces de recorrer cientos de kilómetros transportando personas y mercancías como nunca en la historia. Posteriormente el motor de combustión interna y el motor eléctrico dieron paso a los automóviles como hoy los conocemos, sin embargo, los automóviles con motores de combustión interna dominaron el mercado por casi 100 años. Todos los modos de transporte se enfrentan a la dificultad de almacenar y concentrar la energía para su movimiento. Los animales, así como nosotros, contamos con un sistema metabólico que permite desarrollar movimiento a partir del consumo de alimentos. El alimento para las máquinas móviles fue durante mucho tiempo los combustibles, en especial hidrocarburos fósiles. En el caso de los primeros automóviles eléctricos utilizaban baterías de ácido y plomo que se cargaban desde una red eléctrica mientras que su competidor, el automóvil de combustión, obtenía su energía del combustible líquido sacado de las rocas, el petróleo. La humanidad del siglo XX dio preferencia al automóvil de combustión, pero pasó el tiempo y la urgencia de descarbonizar la atmósfera para combatir el cambio climático, sumado a las flamantes nuevas capacidades de los vehículos eléctricos tienen a muchas industrias enfocadas en lograr la electrificación del transporte.

Los vehículos eléctricos son una de las alternativas más prometedoras para aumentar la seguridad energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) y de contaminantes locales. Actualmente el transporte consume un quinto de la energía producida a nivel mundial y los vehículos de pasajeros emiten un 10% de las emisiones de GHG asociadas a energía. Cabe mencionar que existe la tendencia mundial de que cada persona tenga un vehículo. Este escenario pronostica un gran aumento en el uso de combustible, de contaminación y de aumento de la temperatura del planeta, en el caso que no cambie la forma en que nos movemos. Existen muchas tecnologías de vehículos limpios pero son los vehículos eléctricos de baterías los que hoy llevan la delantera para cambiar este panorama futuro. (“Electric Vehicles Initiative (EVI) | Clean Energy Ministerial”, s. f.)

El mercado del transporte es muy dinámico y la aparición de nuevas tecnologías es uno de los factores que potencian este dinamismo. El desarrollo de las baterías electroquímicas ha permitido acumular energía suficiente para alimentar un vehículo eléctrico que logre las mismas prestaciones que un vehículo de combustión interna. Los vehículos eléctricos tienen muchas cualidades y diferencias con los vehículos tradicionales, por ejemplo: un menor costo de operación, un menor costo de mantenimiento, pero un mayor costo de inversión. Otras de sus cualidades son tener cero emisiones locales, generar bajo ruido, tener un sistema mecánico simple y un movimiento más estable dado su bajo centro de masa. La constante escasez de recursos hace que el factor dominante siempre sea el económico, pero por otro lado los factores de índole medioambiental, como el cuidado del medio ambiente, el uso responsable de los recursos y la descontaminación, cada vez importan más para los tomadores de decisiones y para la investigación y desarrollo tanto en el mundo como en Chile. Esta suma de factores hace que los vehículos eléctricos estén cada vez más presentes en el mundo. Ejemplo de esto es la flota operativa de Aguas

Andinas, a la que se integraron vehículos eléctricos el año 2016 con el objetivo de lograr que el transporte de sus colaboradores, materiales y equipos sea más económico, más eficiente y menos contaminante. Si bien el costo global de estos vehículos eléctricos es mayor que los de sus compañeros de combustión interna, los beneficios en imagen de la empresa y el posible aprendizaje de la nueva tecnología lo compensa.

En el marco del proyecto de electrificación de la flota, al año 2017 existe una importante oportunidad para incluir más vehículos eléctricos. Se vuelve imperante estudiar estas condiciones y evaluar la pertinencia del recambio tecnológico. En consecuencia, en el presente trabajo se considera aspectos técnicos de los vehículos como la eficiencia y el rendimiento; aspectos técnicos de los cargadores como número de vehículos que pueden alimentar, potencia entregada y registro de información; y, por último, aspectos económicos como costos de operaciones, costo de inversión de cargadores y costo de leasing de vehículos.

Este trabajo de titulación busca estudiar el desempeño de un vehículo eléctrico en la flota operativa de Aguas Andinas. Para profundizar el entendimiento del proceso de recambio tecnológico antes mencionado se quiere estudiar el consumo de energía, las exigencias que recibe el vehículo, su costo operacional y consideraciones extras para así estimar el momento oportuno para realizar cambios en la tecnología de la flota y lograr mejoras en rendimiento, beneficios económicos, beneficios de imagen corporativa y ratificar el compromiso con el cuidado del medio ambiente.

A continuación, se presentan los objetivos de este trabajo de titulación.

## 1.2 OBJETIVOS

Objetivo general.

- Estudiar el desempeño de vehículos eléctricos de baterías operando en una flota de servicio técnico en Santiago de Chile.

Objetivos específicos

- Revisar experiencias nacionales e internacionales del uso de vehículos eléctricos.
- Medir de forma experimental el desempeño operacional y energético de vehículos eléctricos de baterías operando en una flota de servicio técnico.
- Analizar resultados experimentales para evaluar el desempeño de vehículos eléctricos.
- Evaluar impactos y beneficios del recambio de vehículos eléctricos en una flota vehicular.

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

El transporte de personas y de mercancías es una de las necesidades de la humanidad desde el principio de su historia. Y, desde hace algunas décadas, el transporte ha sido resuelto por los vehículos con motores de combustión interna, desarrollando una de las mayores industrias del mundo. Sin embargo, este afán por mover a la humanidad ha generado un gran daño ambiental, generando contaminación que pone en riesgo al mismo tiempo la salud de las personas y la salud del planeta. Hoy en día y como siempre existen muchos esfuerzos para mejorar la forma como resolver la necesidad de transportarse y gracias a estos esfuerzos es que se presentan nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y reducir los impactos ambientales del modo de transportarnos. Un ejemplo es el desarrollo de los vehículos eléctricos, los que se espera en un futuro cercano puedan reemplazar a los vehículos contaminantes y poco eficientes.

En la sección 2.1 Vehículos eléctricos, se presenta los antecedentes históricos sobre los vehículos eléctricos en Chile y el mundo, desde los primeros prototipos, su desarrollo a lo largo del siglo XX y como en la actualidad presentan una alternativa para el transporte terrestre, haciendo foco en las partes y funcionamiento; ventajas, desventajas y desafíos; y, finalmente una revisión de la industria automotriz. En la sección 2.2 Flotas Comerciales, se presenta el estado del arte sobre flotas comerciales y ejemplos de flotas comerciales que han integrado vehículos eléctricos en Chile y el mundo. Finalmente, en la sección 2.3 Estudios de desempeño se presenta aspectos teóricos para abordar un estudio de desempeño de un vehículo operando en una flota.

### 2.1 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Esta sección se subdivide en 4 subsecciones que abordan una mirada histórica de los vehículos eléctricos, aspectos técnicos de los vehículos eléctricos, luego las ventajas, desventajas y desafíos para finalmente referirse la industria del auto eléctrico.

#### 2.1.1 Historia y Actualidad

Los primeros vehículos eléctricos fueron desarrollados por Robert Anderson, entre 1832 y 1839 en Escocia, donde construyó los primeros prototipos de carros electro movilizados. Al otro lado del Atlántico, en 1834, Thomas Davenport inventó e instaló el primer motor de corriente directa en un automóvil que funcionaba en un circuito electrificado y cerrado. Pero no es hasta 1894, cuando fue patentado el primer vehículo eléctrico, construido por Henry Morris y Pedro Salom y llamado “Electrobat”. Un paso importante fue dado en 1897, cuando entra al mercado automotriz el primer vehículo eléctrico y es usado como parte de una flota de taxis en Nueva York. El momento en que el fabricante de autos Pope Manufacturing CO. se vuelve la primera empresa que produce vehículos eléctricos a gran escala se podría considerar como el comienzo de la primera era de los vehículos eléctricos. En esos años, un desarrollo que demuestra las prestaciones de los vehículos eléctrico es “La Jamis Contente”, un EV construido en Francia, que en 1899 fue el primer EV en llegar a los 100 [km/h]. En 1900, la venta de vehículos motorizados por electricidad superó a las ventas de las otras tecnologías para vehículos en EE. UU. e incluso en 1909 su presidente de esa nación, William Taft, compró un automóvil eléctrico de marca Baker.

En 1912 la cantidad de EVs llegó a su máximo, 30.000 unidades aproximadamente. Sin embargo, a partir de ese año fueron desplazados por los vehículos de combustión interna. Como causas que influyeron en la caída de los EVs se puede mencionar la innovadora línea de producción de la marca Ford, que redujo

los costos de forma significativa, ya que hasta ese momento los automóviles, tanto eléctricos como de combustión eran producidos por unidades y en bajas cantidades. Sumado a esto también se considera el bajo costo y la gran autonomía que ofrecía y el combustible fósil. La industria no fue benevolente con el vehículo eléctrico a pesar de ventajas como ser silenciosos, fácil de manejar y limpios. Y sí pesaron desventajas como la baja autonomía y baja velocidad de viaje. Ya en la década del 30' los vehículos de combustión interna eran hegemónicos y los eléctricos estaban en extinción.

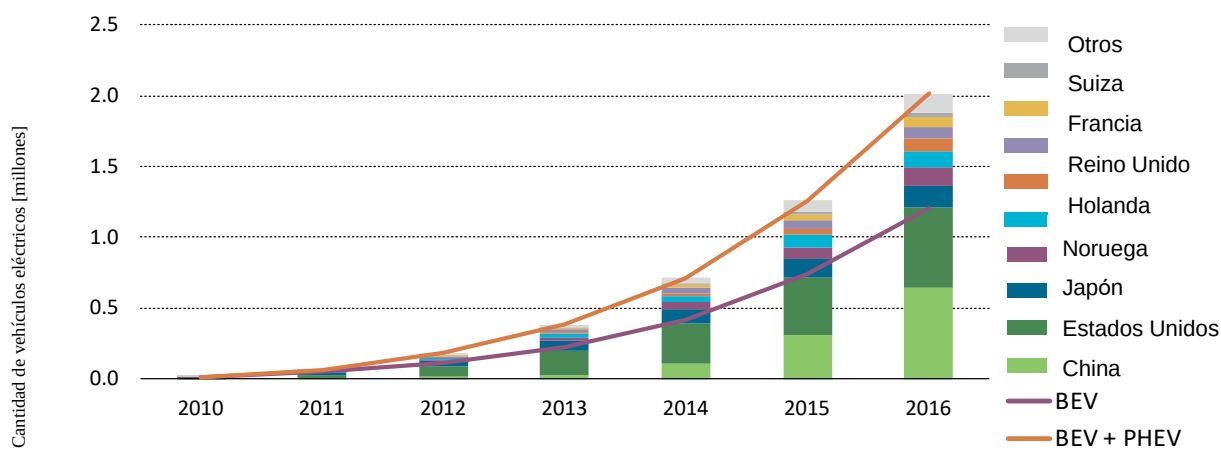
Transcurridos algunos años el alza del precio del petróleo llevó nuevamente a considerar los EVs desde la década del 50'. Sin presentarse grandes avances comenzó la investigación y el desarrollo de vehículos eléctricos e híbridos. No es hasta 1997 que en Japón comienza a venderse el Prius, el primer vehículo comercial híbrido, logrando 18.000 ventas en el primer año. Con este paso se consolida el regreso de los EVs y desde ese año que la penetración de las nuevas tecnologías como híbridos y eléctricos de baterías va en aumento. En los años posteriores al lanzamiento del Prius el recambio de vehículos se ha dado de manera paulatina, pero ya desde hace pocos años existen voces tanto del sector público como del privado que recomiendan el recambio de tecnología. En 2017 el número de vehículos eléctricos supera los 2 millones y sigue aumentando, a pesar de que la tasa de crecimiento ha bajado los últimos años, el año 2016 se vendieron 750.000 EVs en el mundo. En 2014 la tasa era de 84%, en 2015 bajo a 76% y en 2016 solo a 59%. Cabe señalar además que los vehículos eléctricos de baterías representan un 60% mientras que los híbridos llegan a un 40% aproximadamente, la proporción se ha mantenido similar los años anteriores (EVI, 2017). Estos 2 millones de vehículos eléctricos representan tan solo un 0,13% de los 1,5 billones de vehículos a nivel mundial. Esta cifra no es grande en términos netos, sin embargo, existe un interés cada vez más grande por aumentar la flota de EVs a nivel mundial y existen diversos esfuerzos para lograr este objetivo.

Para adentrarse en el mundo de los vehículos eléctricos, es interesante el trabajo realizado por “Electric Vehicle Initiative” (EVI), un organismo multi gubernamental establecido en 2009 bajo el alero de la Agencia Internacional de Energía (IEA: International Energy Agency)<sup>1</sup>. EVI agrupa a 10 países y busca la cooperación global para el desarrollo y despliegue de los vehículos eléctricos. En este marco IEA genera acumulación de datos y análisis de la realidad de los vehículos eléctricos en los países participantes y en el mundo. EVI anualmente lanza un compendio de vehículos eléctricos llamado “Global Outlook 2017” con información proporcionada por los gobiernos de los países participantes. Esta revisión una de las más completas y actualizadas disponibles de forma gratuita. La información de otros países no participantes es obtenida de registros comerciales.

Se muestra en la Figura 1 la tendencia en la cantidad de vehículos eléctricos en el mundo en el periodo 2010-2016, indicando la participación de los principales países que aportan con vehículos y diferenciando entre vehículos eléctricos de baterías (BEV) y el total de BEVs más vehículos híbridos enchufables (PHEV por su sigla en inglés).

---

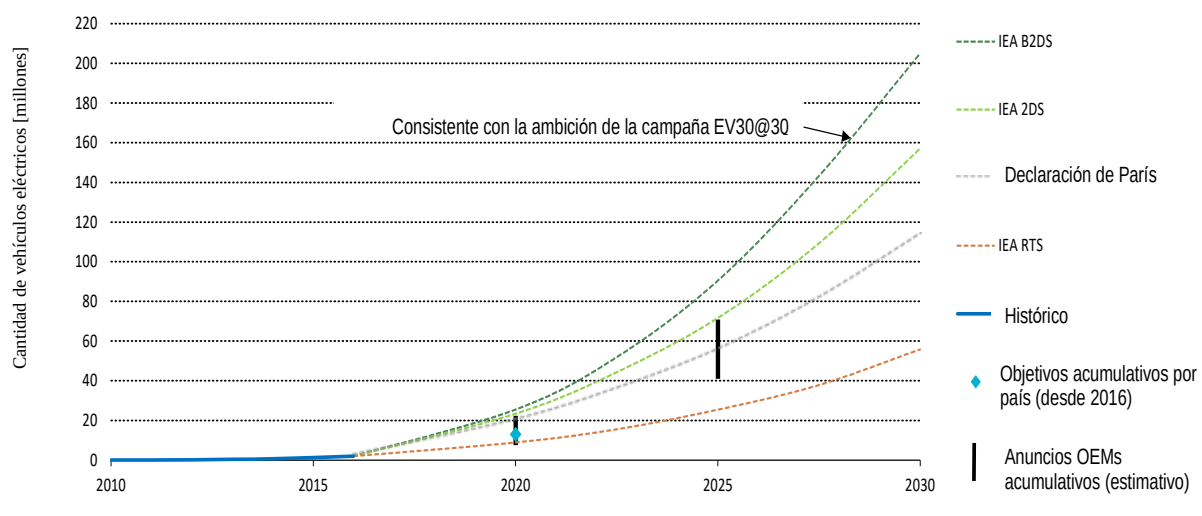
<sup>1</sup> IEA es una agencia internacional conformada por 30 países. Hoy se encuentra en el corazón del diálogo global sobre energía, proporcionando estadísticas y análisis autorizados y examinando todo el espectro de cuestiones energéticas, promoviendo políticas que mejorarán la confiabilidad, la asequibilidad y la sostenibilidad de la energía en sus 30 países miembros y más allá (iea, 2018).



Notas: Las existencias de autos eléctricos que se muestran aquí se estiman principalmente sobre la base de las ventas acumuladas desde 2005. Cuando están disponibles, se han utilizado números de existencias de las estadísticas nacionales oficiales, siempre que haya buena consistencia con las evoluciones de las ventas.

Fuentes: análisis de IEA basado en presentaciones de países EVI, complementado por EAFO (2017a), IHS Polk (2016), MarkLines (2017), ACEA (2017a, 2017b) y EEA (2017).

Como se ve en la Figura 1 hay países líderes en la penetración de EVs, y en términos de proporción de vehículos eléctricos frente a vehículos de combustión interna los países con más avances son los siguientes: Noruega lidera ampliamente con 29%, lo sigue Holanda con 6,4 % y Suecia con 3,4 %. Mientras que China, Francia, y el Reino Unido tienen una participación aproximada de 1,5%. Considerando el número total, China pasó al primer lugar el 2016 con un aumento de 160.000 unidades logrando un total de 336.000 EVs registrados. Los países europeos registraron una venta de 215.000 unidades el mismo año, concentradas principalmente en Noruega, Reino Unido, Francia, Alemania, Holanda y Suecia. En la Figura 2 a continuación, se presenta la proyección del parque de vehículos eléctricos al año 2030, reportado por la Agencia Internacional de Energía (IEA, en su “Global EV Outlook 2017”).



Notas: El RTS incorpora mejoras tecnológicas en eficiencia energética y opciones modales que respaldan el logro de políticas anunciadas o en estudio. El 2DS es consistente con una probabilidad del 50% de limitar el aumento de temperatura promedio global esperado a 2 ° C. El B2DS se encuentra dentro del rango de ambición del Acuerdo de París, que corresponde a un aumento promedio en la temperatura global de 1.75 ° C.

Figura 2. Escenarios de desarrollo de la cantidad de vehículos eléctricos. (EVI, 2017)

De acuerdo con estas estimaciones, se espera que los EVs lleguen a un número de entre 9 y 20 millones para el 2020, y un total de entre 40 y 70 millones para el 2025. Entre los factores que se espera influyan en el despliegue se pueden desatacar: la oferta de vehículos de nuevas tecnologías a precios atractivos, políticas de incentivos por parte de los gobiernos, desarrollo tecnológico sobre todo orientado a las baterías y la instalación de una red de puntos de carga.

Varios fabricantes están anunciando avances en su producción de vehículos eléctricos para los próximos años. Entre estas puede mencionarse Chevrolet GM, Daimler, Ford, Honda, Renault-Nissan, Tesla, Volkswagen, Volvo y algunas marcas chinas. En cuanto a los gobiernos, algunos países proponen eliminar las ventas de vehículos de gasolina y diésel para llegar a flotas vehiculares 100% eléctricas. Francia y Reino Unido han fijado el año 2040 como meta para este objetivo (CNN, 2017). Respecto de la investigación y desarrollo sobre las baterías y los sistemas de recarga se ve un avance constante y un ecosistema industrial activo y dinámico que busca reducir costos, mejorar la autonomía y el acceso a electroli-  
neras.

En la actualidad Chile presenta variados casos de uso de EVs. Un caso para mencionar es el proyecto piloto de operaciones en condiciones comerciales de tres (3) taxis eléctricos y de un (1) bus eléctrico en la Ilustre Municipalidad de Santiago. Este proyecto piloto se logró con el aporte del sector público y privado en el marco de la primera Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada (NAMA, por sus siglas en inglés) para el Transporte en Chile (CAF, 2016). Otro proyecto de EVs en Chile es el de ENEL que a través de un programa “más verde” ha ofrecido bonos e incentivos a sus empleados para la adquisición de 30 automóviles eléctricos (EMOL, 2017).

Otro avance importante en Chile es el uso de buses eléctricos para el transporte público. En noviembre de 2017 comienza la operación de 2 buses eléctricos (marca BYD modelo K9FE) en la flota del operador METBUS de Transantiago, en el recorrido 516 y beneficiando a 8 comunas de la capital (DTPM, 2017). En diciembre de 2017 se incorpora un tercer bus eléctrico (marca Yutong modelo KZ6128) en manos del operador VULE, en un recorrido que conecta el centro de Santiago con el norte de la ciudad.

Otro caso importante es el de Aguas Andinas, la empresa sanitaria más grande de Chile, que implementó un proyecto piloto de flota vehicular con autos eléctricos, logrando ser pioneros en la industria sanitaria con el uso de vehículos eléctricos en su flota operacional. Este proyecto consistió en la operación de 3 furgones Renault Kangoo y se espera para las próximas renovaciones aumentar la cuota de EVs de la flota (Aguas Andinas, 2016).

Hoy en día el desarrollo de los vehículos eléctricos y la migración a este no tan nuevo modo de transporte es un compromiso tanto de instituciones gubernamentales a lo ancho del globo como de las industrias automotrices.

### 2.1.2 Partes y funcionamientos de los vehículos eléctricos

Como primer paso para entender el funcionamiento de los vehículos eléctricos hay que diferenciar los tipos de vehículos eléctricos. Vehículo como medio de transporte de personas o cosas y eléctrico que implica que la fuente de energía para generar el movimiento es la electricidad. En este trabajo, al referirnos a vehículo eléctrico, es un automóvil que usa uno o más motores eléctricos energizado por electricidad almacenada en baterías a bordo del automóvil. En adelante nos referiremos a estos vehículos con la abreviatura BEV, por su nombre en inglés, “battery electric vehicle”. En esta sección la información se enfoca en los automóviles eléctricos, entiéndase vehículos de calle para pasajeros de 4 ruedas. No se

profundizará sobre otros tipos de vehículos eléctricos como los de tracción humana electro-asistidos, vehículos de 2 o 3 ruedas ni otros vehículos más pesados como buses.

También existen los vehículos híbridos, estos son vehículos que tienen motores eléctricos y además motor de combustión interna. Los vehículos híbridos pueden usar los motores eléctricos y un motor de combustión eléctrica donde la propulsión es realizada por cada uno por separado o por ambos, en configuración en serie o en paralelo. Los vehículos híbridos enchufables, son la vanguardia en híbridos ya que pueden funcionar completamente como un BEV y ocupar el motor de combustión interna para recargar el banco de baterías o pueden ocupar la potencia generada por su motor de combustión en caso de ser necesario. Nos referiremos a estos últimos como PHEV por su nombre en inglés, “plug-in hybrid electric vehicle”. Es importante hacer estas definiciones ya que además de vehículos como automóviles, camiones y buses eléctricos se han desarrollado en el mundo bicicletas, motocicletas, trenes, incluso aviones eléctricos, que también caben dentro de la definición amplia del concepto vehículo eléctrico.

Las partes importantes y que diferencian un BEV de un automóvil convencional son el drive motor, el banco de baterías y el cargador. Estos componentes reemplazan el sistema estanque, motor, transmisión de los vehículos de combustión interna (ICV por internal combustion vehicle). Siguiendo el flujo de energía, los vehículos eléctricos se cargan a través de un cargador, este es el vínculo entre la red de energía eléctrica y el vehículo. Si bien no es una parte física del vehículo, sí es parte funcional de éste. El cargador cumple con entregar la energía eléctrica, regula la tensión, la corriente y la potencia que se entrega por el cable de alimentación. La batería almacena la energía que es requerida luego por el controlador para entregarla al motor, que a su vez envía el movimiento a las ruedas a través de la transmisión. En específico este funcionamiento puede darse en múltiples configuraciones, por ejemplo, un motor, controlador y un sistema de transmisión que entrega la potencia a las ruedas o una configuración de motores en las ruedas, “in-wheel” o sea motores que forman un conjunto con la rueda por ende no requieren sistema de transmisión, pero si requieren control electrónico para más de un motor.

### *Motor de un vehículo eléctrico.*

La característica específica de un vehículo eléctrico es que cuenta con un motor eléctrico en vez de un motor de combustión interna. Las principales características que deben poseer los motores eléctricos empleados para la propulsión de EV pueden resumirse de la siguiente manera:

- Alta densidad de potencia con el fin de minimizar el volumen ocupado por los motores y reducir el peso adicional que debe transportar el EV.
- Alto torque de arranque y de bajas velocidades con el fin de lograr una rápida aceleración y disponer de alta capacidad para superar pendientes. Es deseable una zona de torque constante.
- Amplio rango de velocidad, para funcionar correctamente en las aplicaciones típicas de conducción en ciudades y autopistas.
- Baja inercia para lograr respuestas rápidas ante cambios en la velocidad.
- Alto rendimiento en todo el rango de velocidades con el fin de poder superar requerimientos adicionales durante breves períodos.
- Bajos requerimientos de mantenimiento.
- Coste razonable.

En vehículos eléctricos una tecnología ampliamente usada es la de motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM Permanent Magnet Synchronous Motor) Este tipo de motores usa imanes permanentes en el

rotor para generar el campo magnético, logrando una construcción simple y robusta con alta eficiencia (97%) y alta densidad de potencia. Estos motores son usados en modelos híbridos como el Chevrolet volt, el BMW i3 y el Nissan Lea (Doppelbauer & Winzer, 2017). Los motores PMSM tienen desventajas a alta velocidad ya que se requiere mucha corriente para mantener una potencia constante afectando su eficiencia (Jahns T. , 1987). Para algunos actores, otra desventaja de estos motores es el uso de imanes permanentes de tierras raras cuyas reservas se encuentran principalmente en China (90%) lo que genera una gran dependencia con este país (Bloomberg, 2017). Presumiblemente estas desventajas han sido un aspecto importante para que otros fabricantes elijan motores de rotor bobinado (SPSM) y motores de inducción (IM), con ejemplos como el Renault Zoe y los vehículos de Tesla respectivamente. Estas otras alternativas de motores tienen eficiencia algo menor (94%) pero una amplia zona de operación con esta eficiencia a alta velocidad (Doppelbauer & Winzer, 2017), lo que puede mejorar la eficiencia global del vehículo considerando ciclos típicos y estilos de conducción. Las alternativas de motores antes mencionados PMSM, SPSM e IM son máquinas AC alimentadas por un inversor controlador, por lo que desde el punto de vista del control comparten muchas características.

Desde el punto de vista constructivo, los fabricantes ubican un motor eléctrico acoplado a un sistema de transposición, en la misma posición que ocupa un motor de combustión interna. Por otro lado, los motores in-wheel tienen un desarrollo todavía menor, pero se tiene grandes expectativas para este tipo ya que permitiría tener en un mismo espacio, sistema motor, transmisión y freno regenerativo, liberando espacio de carrocería.

Los motores eléctricos son superiores a los motores de combustión interna si se considera su fácil construcción, mantención y robustez. En el caso de los motores eléctricos se tiene solo 2 pares móviles; el conjunto estator y rotor, y una caja reductora. Esto presenta una gran diferencia en comparación con los cientos de partes móviles que tiene el conjunto motor de combustión y transmisión. Tanto el rotor como el estator son alimentados por un convertidor estático sin partes móviles, compuesto por tarjetas electrónicas y semiconductores de potencia. Es por esto por lo que una vez superada la dificultad técnica de entregar energía constante y que permita una gran autonomía, los motores de combustión interna podrían quedar obsoletos y relegados a aplicaciones donde no se pueda emplear energía eléctrica. El controlador de un vehículo eléctrico cumple la función de, valga la redundancia, controlar a través de la electrónica de potencia, la energía entregada desde la batería al motor. Este realiza la inversión de la corriente, es decir el cambio de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) y regulación de la frecuencia entregada al motor para así controlar la velocidad del vehículo y mantener el punto de operación a diferentes velocidades.

En el caso de vehículos pesados, se puede mencionar que, para los trenes eléctricos e híbridos, son usados generalmente motores de inducción (Jahns T. , 2017). También puede mencionarse los vehículos pesados para minería, como camiones de carga híbridos que usan motores de inducción (Komatsu, 2015), o cargadores frontales que usan motores de reluctancia conmutada SR (Jahns T. , 2017).

En la Figura 3 a continuación se presenta una tabla comparativa para 4 tipos de motores; IPM neodimio: Motor sincrónico de imanes permanentes; SynR: Motor sincrónico de rotos bobinado; IM: Motor a inducción y; SR: Motor reluctancia conmutada.

| Característica                                                   | IPM<br>Neodimio | SynR | IM | SR |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|------|----|----|
| Densidad de Torque / Potencia                                    |                 |      |    |    |
| Eficiencia a Operación Nominal                                   |                 |      |    |    |
| Eficiencia a alta Velocidad y Carga Parcial                      |                 |      |    |    |
| Alto CPSR (razón de velocidad de operación a potencia constante) |                 |      |    |    |
| Capacidad de operar a Temperaturas extremas y robustez del motor |                 |      |    |    |
| Bajo Costo                                                       |                 |      |    |    |
| Bajo ruido acústico y <i>ripple</i> en el torque                 |                 |      |    |    |
| Capacidad de autodetección de la posición a baja velocidad       |                 |      |    |    |
| Tolerancia a fallas                                              |                 |      |    |    |

|                            |                         |
|----------------------------|-------------------------|
| <b>Significado colores</b> |                         |
|                            | Comparativamente fuerte |
|                            | Intermedio              |
|                            | Comparativamente débil  |

Figura 3. Comparación de características para distintos tipos de motores para tracción de EV de pasajeros. Fuente: “Prospección tecnológica en el sector energético”, MINEN 2018.

Otra consideración importante en el sistema motor de un EV es el freno regenerativo, que convierte parte de la energía cinética en electricidad y la almacena nuevamente en la batería recuperando la energía que ya había salido de las baterías aumentando así la eficiencia global del vehículo. Este sistema se basa en el funcionamiento inverso de los motores eléctricos que les permite funcionar como generador, cambiando los terminales de alimentación que extraen energía de las baterías en terminales que suministran energía eléctrica a las baterías. Con los frenos regenerativos también se reduce el ruido que produce un vehículo, ya que mientras este sistema frena no se produce roce mecánico (Alguacil, 2016).

### Baterías

Actualmente las baterías, son la parte más crítica de los EVs. Con el desarrollo de estas, se espera lograr una adopción masiva de los EVs (Chen, 2009). Esto es por lo que la investigación y el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía no solo se enfoca en las típicas baterías electroquímicas, sino que también está en la búsqueda de otras alternativas como son los acumuladores electrostáticos típicamente llamados capacitores o acumuladores de energía cinética conocidos como fly-wheel. No obstante, la batería electroquímica es la que han logrado una madurez tecnológica y comercial en la última década no solo para aplicaciones en vehículos eléctricos sino también en equipos móviles de uso cotidiano como computadores, teléfonos celulares, bicicletas, motocicletas aviones ligeros y buses. En el almacenamiento electroquímico se encuentran distintas tecnologías, baterías y celdas de combustible. Entre las baterías se puede encontrar las de ion-litio, zebra (sodio-níquel), hidruro de níquel metal, y plomo-ácido (Sabihuddin, 2015).

Las baterías de ion-litio típicamente usadas para BEV funcionan realizando una reacción reversible de intercalación de iones (huésped) en un ánodo construido de carbono grafítico en estructura de capas (anfitrión), provenientes de un cátodo de óxido de metal litiado ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMnO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$ , etc.), con la ayuda de un electrolito de sales de litio (p.e.  $\text{LiPF}_6$ ) (Chen, 2009). La efectividad de esta reacción depende de la diferencia de potencial entre la especie huésped y el compuesto anfitrión. En las últimas décadas se han publicado muchos compuestos que pueden ser utilizados como ánodos y cátodos para baterías recargables de ion-litio, por ejemplo, entre los cátodos cabe destacar compuesto de litio-cobalto-oxígeno o LCO ( $\text{LiCoO}_2$ ), de litio-manganeso-oxígeno o LMO ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), litio-níquel-manganeso-cobalto o MNC, litio-níquel-cobalto-aluminio o NCA y litio-hierro-fosfato o LFP ( $\text{LiFePO}_4$ ), este último considerado como la nueva generación de baterías recargables de litio por contener hierro, el elemento metálico

de transición más abundante en la corteza y es no tóxico, sin embargo estos beneficios se acompañan con una menor densidad de energía. Como ánodo se usa típicamente el grafito o grafiticos. Los parámetros específicos de una batería recargable de litio son la capacidad específica del sistema [Ah/kg], voltaje de trabajo [V], energía específica [Wh/kg], (Helbig, Bradshaw, Wietschel, Thorenz, & Tuma, 2018). Los diferentes tipos de baterías presentan diferencias en cuanto a sus aplicaciones óptimas y costos asociados a su uso. En la Tabla 1 se muestran estos parámetros para cada tipo de baterías de ion-Litio.

*Tabla 1. Tipos de baterías de ion-Litio comerciales y sus propiedades electroquímicas. Elaboración propia en base, fuente (Helbig, Bradshaw, Wietschel, Thorenz, & Tuma, 2018)*

| Tipo           | Cátodo                                                                 | Ánodo                                           | Diferencia de potencial (V) | Capacidad específica (Ah/kg cátodo) | Energía específica (Wh/kg cátodo) |
|----------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>LCO-C</b>   | LiCoO <sub>2</sub>                                                     | Grafito                                         | 3.8                         | 150                                 | 570                               |
| <b>LMO-C</b>   | LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                       | Grafito                                         | 4.1                         | 120                                 | 492                               |
| <b>NCA-C</b>   | Li(Ni <sub>1-x-y</sub> Co <sub>x</sub> Al <sub>y</sub> )O <sub>2</sub> | Grafito                                         | 3.7                         | 200                                 | 740                               |
| <b>NMC-C</b>   | Li(Ni <sub>x</sub> Mn <sub>y</sub> Co <sub>1-x-y</sub> )O <sub>2</sub> | Grafito                                         | 3.7                         | 170                                 | 629                               |
| <b>LFP-C</b>   | LiFePO <sub>4</sub>                                                    | Grafito                                         | 3.4                         | 165                                 | 561                               |
| <b>LFP-LTO</b> | LiFePO <sub>4</sub>                                                    | Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> | 3.4                         | 165                                 | 305                               |

En general, para las baterías de vehículos eléctricos es importante el costo, la durabilidad asociada a los ciclos de carga y descarga, pero por sobre todo la seguridad, es importante que la batería no se incendie ni explote en caso de colisión del EV. Un factor deseable es que puedan ser recicladas sin eliminar desechos tóxicos luego de su vida útil.

Respecto de la operación de las baterías una variable importante es el estado de carga (SOC- State Of Charge), que es el porcentaje de energía que le queda a la batería en relación con la carga total. La profundidad de descarga (DOD – Deep Of Discharge), que es el porcentaje de la energía que se ha utilizado de la batería (DOD = 100 – SOC (%)). Y el voltaje en circuito abierto (OCV – Open Circuit Voltage) es la tensión en bornas de la batería eléctrica en ausencia de carga eléctrica.

Hoy en día las baterías han logrado niveles de densidad de energía y potencia adecuados para ser empleadas en vehículos eléctricos. Por ejemplo, se puede encontrar baterías pequeñas de 6kWh en el monoplaza Renault Twizy de hasta 100 [kWh] en el Tesla Model S P100D que ofrece una durabilidad de 10 años con 10.000 ciclos de carga.

Considerando aplicación comercial de estas tecnologías, sobre todo para EV, los parámetros importantes son el costo de la batería y el rango de autonomía que permiten. Siguiendo con el ejemplo del parrado anterior, el Tesla Model S P100D, ofrece un rango de 550 [km] pero la empresa ha anunciado para el 2019 el modelo Tesla Roadster 2 que alcanzaría un rango superior a los 1000 [km]. El rápido desarrollo de la tecnología de baterías electroquímicas ha hecho que el costo se reduzca en un 65% desde el 2010 al 2016. Considerando que el costo de las baterías es alrededor de 50% del costo de un vehículo, se prevé que la paridad en costos entre un ICV y un BEV para la mayoría de los países se logre entre los años 2025-2029 para el segmento de vehículos masivos (BNEF, 2017b). En la Figura 4. Variación del costo y la densidad de energía de las baterías. se ve que el costo de las baterías ha tenido una reducción desde sobre 900 [USD/kWh] en 2009 hasta menos de 300 [USD/kWh] en 2016. Por su parte, la densidad de energía ha aumentado desde poco más de 100 [Wh/L] en 2009 hasta poco menos de 350 [Wh/L].

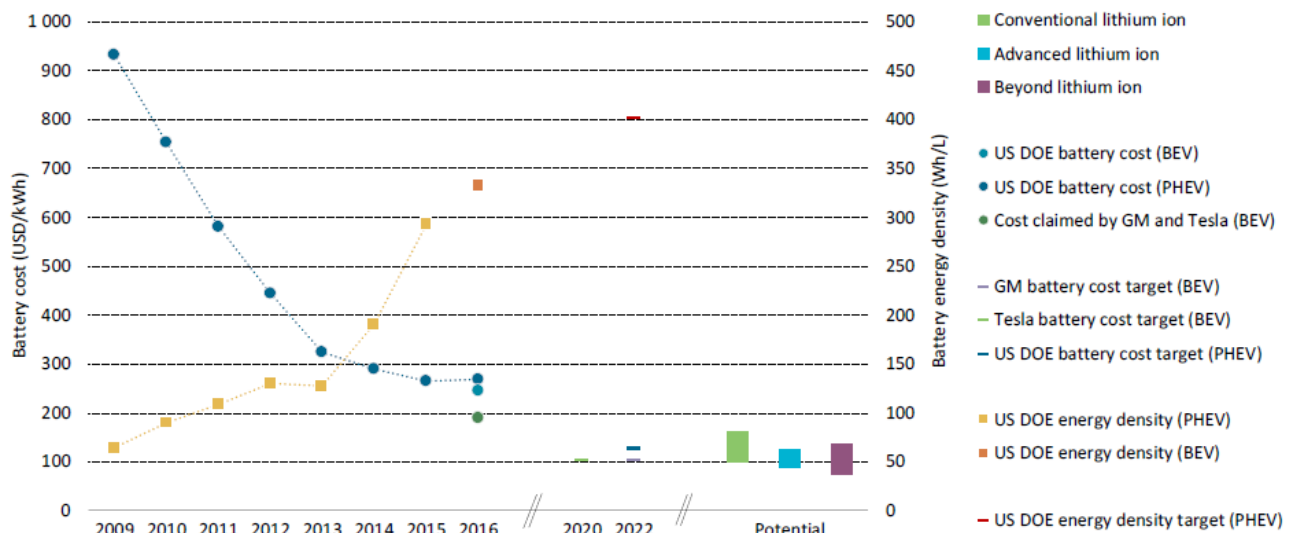


Figura 4. Variación del costo y la densidad de energía de las baterías (EVI, 2017).

## Cargador

El proceso de recarga de los vehículos ha cambiado desde su el inicio de su comercialización a partir del 2010. Lo que se preveía funcionara principalmente con carga residencial se ha ido modificando ante la necesidad de mayor capacidad y recarga de oportunidad de carga en lugares públicos y en los puestos de trabajo (J. Sexauer, 2013)\_(P. Fan, 2015) (D. Bowermaster, 2017). El desarrollo del proceso de carga rápida, sumado a los cargadores instalados en lugares públicos entregan, por un lado, una mejor gestión de la energía de la red cuando permite el uso del recurso energético en horario de baja demanda y por otro lado entrega una mayor flexibilidad de uso de los vehículos en tanto estos pueden cargar en el lugar que se estacionen, sea en los hogares o los lugares de trabajo, y así siempre tener energía disponible para emprender el rumbo.

El proceso de recarga es crítico tanto para el funcionamiento del vehículo eléctrico como para la operación de distribución de energía eléctrica. Existen diferentes clasificaciones para los modos de recarga, que pueden considerar como se establece la conexión los niveles de corriente y voltaje asociados, y la forma en que la energía es inyectada. La clasificación que genera más consenso considera 3 niveles para cargas con corriente alterna (CA), a saber: nivel AC1, que considera cargadores monofásicos de menos de 1,92 [kW]; nivel AC2, que considera cargadores monofásicos como trifásico con potencias entre 1,92 [kW] y 19,2 [kW]; finalmente, el nivel AC3, que considera cargadores trifásicos con potencias entre 20 [kW] y 80 [kW] (Yilmaz, 2013). Fuera de esta clasificación quedan las recargas de corriente continua (DC) realizadas por un equipo externo al vehículo. Es importante mencionar que en cuanto al modo de transferencia de energía eléctrica se puede considerar contactos directos con un cable y un enchufe, o también puede ser transferencias inductivas. La carga inductiva tiene un gran potencial considerando que se podría transferir energía a los vehículos incluso en movimiento (Stanford News, 2017). No obstante, los cargadores conductivos son usados casi en la totalidad del mercado (Yilmaz, 2013).

Otra consideración importante es el tiempo de carga, los niveles AC1 y AC2 se consideran de carga lenta y se consideran para cargas nocturnas con una duración cercana a 7 horas para un EV. Mientras que los cargadores rápidos pueden cargar un vehículo en una fracción de ese tiempo para cargar durante el día o para recuperar una parte de la batería y aumentar el rango del vehículo. Si bien la industria automotriz hace grandes esfuerzos por aumentar la capacidad de baterías para llegar entre 60 y 100 [kWh] y con

esto el rango de los EVs (D. Bowermaster, 2017), esto acarrea un requerimiento de carga que va entre los 350-400 [kW] para cargadores CD.

### 2.1.3 Ventajas, desventajas y desafíos

La primera ventaja por mencionar es que la energía eléctrica usada por los EVs puede venir de cualquier tipo de generación, implicando que la energía primaria para hacerlos funcionar puede venir de centrales térmicas, hidroeléctricas, solares, etc. Esto una ventaja frente a las emisiones ya que los EVs tienen cero emisiones locales. Solo habría emisiones asociadas a la operación de los EVs si la generación eléctrica tiene emisiones asociadas, por el contrario, si la energía eléctrica proviene de fuentes no contaminantes la operación tendría cero emisiones globales. Esta es una de las ventajas más importantes que ha contribuido al cambio de conciencia frente al uso de los combustibles y las emisiones de gases contaminantes, al presentar una alternativa viable de cambio tecnológico que aporta al cuidado del medio ambiente y la sustentabilidad de la humanidad completa.

Como ya se ha mencionado anteriormente los EVs tienen cero emisiones locales, esto además de ser importante para la problemática del cambio climático, dado que controla las emisiones de gases de efecto invernadero, también es muy importante desde el punto de vista sanitario ya que elimina fuentes contaminantes locales como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (MP) generado por los motores de combustión interna. Incluso si la generación fuera a base de combustibles mejoraría la calidad del aire con la inclusión de EVs.

Otra ventaja es la simplicidad de la tecnología del motor eléctrico en comparación con los motores de combustión interna. La cantidad de piezas móviles es mucho menor y por ende las posibles fallas internas son mucho menores. Esto hace que los motores eléctricos sean mucho más fáciles de mantener y reparar. También son simples de construir, lo que podría permitir masificar y diversificar la fabricación de EVs, ampliando un mercado de fabricantes de vehículos que hoy en día tiene no más de unos cuantos fabricantes en todo el mundo.

La eficiencia energética de los BEV es mucho mayor que la de los ICV, cada uno de los componentes importantes tiene eficiencia nominal mayor al 80%. Por ejemplo, los motores eléctricos actuales tienen eficiencia en promedio cercana al 95% en condiciones nominales, si bien esta eficiencia decrece con la exigencia, en comparación los motores de combustión interna actuales tienen una eficiencia que rodean el 30% ya que pierden mucha energía en forma de calor e incluso alcanzando una eficiencia global aún más baja. La eficiencia global de los EVs también se ve beneficiada por el sistema de frenos regenerativos que permiten recuperar una fracción importante de la energía cinética a la hora de frenar y que en los autos convencionales se pierde por fricción en forma de calor y desgaste de los frenos. Además, los EVs no consumen energía mientras están detenidos lo que es muy importante en ciudades, donde el modo de conducción obliga a estar detenido en cruces, o cuando el tráfico es lento. La eficiencia energética y el precio bajo de la electricidad hacen que un auto eléctrico tenga un muy bajo costo de operación en comparación con un vehículo de gasolina.

Las baterías son grandes acumuladores de energía con alta eficiencia, por lo tanto, la energía acumulada en un BEV (entre 16-100[kWh]) puede ser usada como abastecimiento de respaldo para un hogar. Esta posibilidad impone el desafío de adaptar la red eléctrica para recibir energía de los BEV, en lo que se define como una conexión del vehículo a la red (V2G: vehicle to grid). La gestión de carga y descarga de las baterías de los BEV entregará al sistema eléctrico puntos de acumulación distribuido en las ciuda-

des, lo que en general presenta más beneficios que problemas, pero impone la urgencia de realizar acciones de coordinación del sistema eléctrico con el transporte, relación que no había sido tan directa con los vehículos de combustión interna.

No menos importante es la reducción del ruido, los EVs no producen más ruido que el que se genera por su movimiento sobre las calles y es mucho menor si se ve para el caso de buses o vehículos de gran tamaño que tienen grandes motores de combustión interna muy ruidosos.

En el ámbito nacional, es importante el desarrollo de los vehículos eléctricos dado que el requerimiento de cobre de un BEV es mucho mayor que el de un ICV. Considerando que Chile tiene grandes reservas de este metal la electromovilidad puede generar grandes beneficios para Chile asociados a una mayor demanda de cobre.

Las principales brechas para la penetración de BEV en los mercados mundiales a escala masiva vienen dados por la maduración de la tecnología, no obstante, las principales dificultades ya están identificadas y en todo el mundo se trabaja para darles respuesta. Una de las principales es el alto costo de inversión de un vehículo eléctrico en comparación con un vehículo convencional, bordeando una diferencia de 100% para vehículos similares en porte y prestaciones. No obstante, esta diferencia se reduce todos los años incluso estimando que se llegará a la paridad de precios para entre 2025 y 2029 (BENF, 2017a).

Otra brecha por resolver es la dificultad para el almacenamiento de la energía, actualmente, la capacidad energética de los vehículos disponibles en el mercado chileno permite tener autonomías de alrededor de 150 kilómetros, con excepciones que rondan los 300 [km]. No obstante, el costo de las baterías es aproximadamente el 50% del costo total del vehículo.

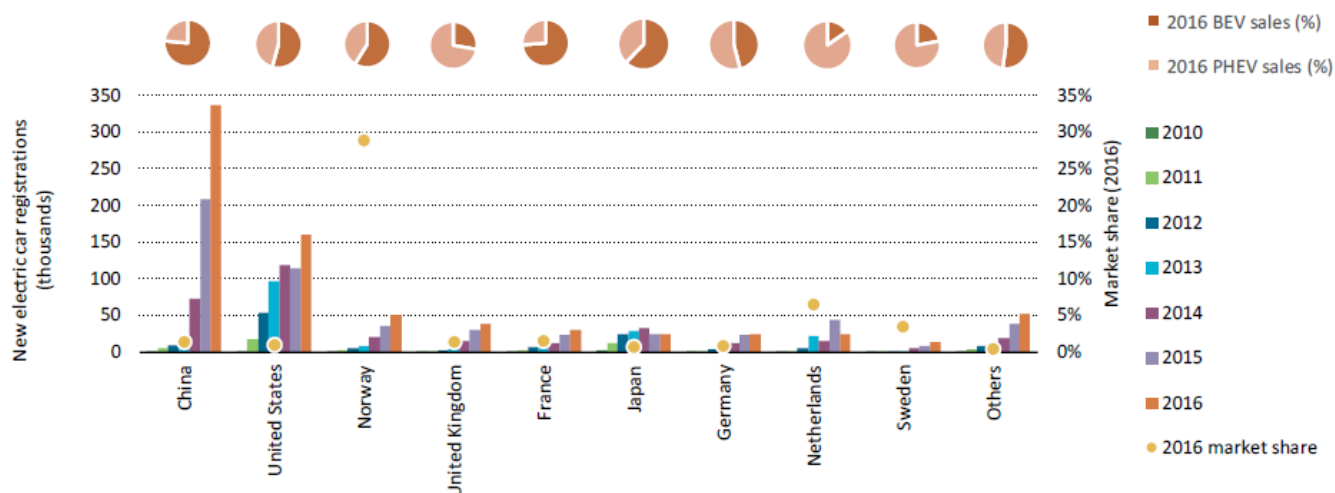
Otra dificultad es la carga de la energía eléctrica. El tiempo de recarga de las baterías es alrededor de 6 horas en una conexión monofásica de 220 [V], pero ya existen baterías y centros de carga rápida que pueden cargar más del 80% de las baterías en menos de una hora, ambos tipos de recarga dependen del vehículo en específico y la capacidad de su batería. Aun así, es mucho mayor el tiempo si se compara con que un estanque de combustible se puede llenar en un par de minutos. Además, para poder realizar una carga rápida se necesita una estación de carga rápida, lo que implica tener un empalme con mayor potencia y todo lo que conlleva este requerimiento técnico. La necesidad de instalar infraestructura para cargar un EV es una desventaja frente a las estaciones de combustible que ya están distribuidas por todo el mundo, aunque estas también tienen un alto costo, ya están construidas.

El desafío entonces para la industria de los vehículos eléctricos es lograr un desempeño igual a un vehículo convencional en cuanto a autonomía a un precio de mercado competitivo. Por otro lado, se requiere que las personas sepan que los EVs son mejores que los vehículos convencionales en muchos aspectos y que incluso el alto precio se compensa con la reducción del gasto en combustible. Desde el punto de vista del sistema eléctrico este tendrá que ofrecer el soporte para traspasar el gasto energético del transporte terrestre a la electricidad, gasto energético, que hoy está soportado por los hidrocarburos.

#### 2.1.4 Industria del auto eléctrico

El año 2016 hay más de 2 millones de autos eléctricos, considerando BEV y PHEV; siendo China el país el mayor desarrollo en la electrificación del transporte, alcanza un tercio del total mundial, además de contar con 200 millones de vehículos de 2 ruedas (motos y bicicletas), más de 3 millones de vehículos de livianos de baja velocidad (LSEVs) y más de 300.000 buses eléctricos. El 2016 se vendieron 750.000 autos eléctricos, donde fue Noruega el país que lidera ampliamente con un 29% de las ventas, seguido

por Holanda con un 6,4% y Suiza con 3,4%. menor participación del mercado. Los BEV al año 2016 alcanzaron cerca de 1,2 millones mientras que los PHEV bordearon los 800 mil vehículos. Desde 2010 que las ventas de vehículos eléctricos han crecido a razón de 50% anual, salvo el año 2016 donde se ve un crecimiento de 40% sobre el 2015. A pesar de esta pérdida el crecimiento de las ventas aún es auspicioso y se ajusta a los modelos creados para cumplir la meta de frenar el calentamiento global. Sin embargo, las ventas llegaron a un nuevo tope el 2016 con aproximadamente 750.000 unidades vendidas (EVI, 2017). A continuación, se muestra las ventas de los países EVI desde 2010 hasta 2016.



Sources: IEA analysis based on EVI country submissions, complemented by EAFO (2017a), IHS Polk (2016), MarkLines (2017), ACEA (2017a, 2017b) and EEA (2017).

Figura 5. Ventas de vehículos eléctricos, participación de mercado y participación de BEV y PHEV en los países EVI, de 2010 al 2016. (EVI, 2017)

Según datos recopilados entre los países asociados en la “Electric Vehicles Initiatives” (EVI), hasta fines del 2014, la cantidad global de vehículos eléctricos (EV) era de aproximadamente 665.000, lo que representa un 0,08% del total de autos. Este número ha ido en incremento desde el 2010 donde la venta de EV era unos pocos miles hasta 2014 donde las ventas fueron de 300.000 aproximadamente (EVI, 2017).

En este marco existen varias compañías fabricantes de automóviles que están volcando su desarrollo a los EVs y otras compañías nuevas en la producción de vehículos que están apostando a ingresar en este mercado, entre estas compañías relativamente nuevas se encuentran, por ejemplo, BYD Company y Tesla Motors. Estas dos tienen una participación en el mercado de los vehículos eléctricos y presentan alternativas diferenciadoras que vale la pena mencionar. Por su parte BYD, tiene un foco puesto en el generar una movilidad sustentable para el mundo, haciendo énfasis en el transporte público eléctrico y en esa dirección está extendiendo el uso de sus vehículos como flotas de taxis y buses, cero emisiones y eficientes por varios países (BYD Company, 2016). Y por un camino paralelo Tesla Motors propone revolucionar la industria con la misión de acelerar la transición del mundo hacia una energía sustentable (Tesla Motors, 2018).

## 2.2 FLOTAS COMERCIALES

En esta sección se presenta los antecedentes para poder entender el trabajo que realiza un vehículo en una flota comercial. Esta sección presenta las características de la operación que diferencia un vehículo

comercial y un vehículo particular. Se presentan los tipos de flota y sus características, y por otro lado las características específicas de la flota estudiada.

Importante es mencionar que un vehículo de una flota comercial forma parte de la operación que pretende generar recursos, donde la operación del vehículo puede ser la fuente de ingresos o ser parte de un proceso complementario a un negocio de otra área. En este sentido, uno de los principios que se considera es que un vehículo debe usarse para obtener beneficios económicos, y, por el contrario, si no se usa se convierte en un activo congelado.

### 2.2.1 Tipos de flotas

Según la lógica del tipo de carga el transporte puede dividirse en transporte de pasajeros y transporte de mercancías. Los pasajeros se mueven hacia múltiples destinos según necesidades personales o laborales, mientras que las mercancías se mueven en general desde lugares de producción hasta lugares de consumo. Cabe mencionar que la forma en que se abordan estos dos tipos de transporte tiene múltiples diferencias. El transporte de mercancías mueve millones de toneladas a lo ancho del mundo, para mover grandes cargas mayormente se usa barcos, trenes y camiones de gran tonelaje. Desde focos productivos salen camiones cargados hacia puertos o centros de distribución, en el primero salen barcos con destinos lejanos o y en los segundos salen vehículos medianos o pequeños a entregar a consumidores finales o comercio menor. Existe una rama del estudio del transporte llamada “Transporte de última milla” que estudia cómo se reparten mercancías en las proximidades de los consumidores finales donde las complejidades son mantener stock en centros de venta y cumplir con el servicio en condiciones urbanas, de alto tráfico y gran cantidad de puntos para distribuir. Por otro lado, el transporte de pasajeros se presenta con opciones como aviones, barcos, buses, automóviles, motos, bicicletas o caminata. Dado la distancia que se necesita recorrer las personas eligen un modo u otro. Bajo estas condiciones una flota comercial puede dar respuesta a la necesidad de transportar personas, cosas o ambas para cumplir una u otra función (UNAB, 2016).

El mercado exige a las empresas de transporte de carga una constante reducción de costos, mejoras en la rentabilidad, disminución de impactos ambientales a través de la búsqueda de una excelencia en el servicio de transporte de carga. Para esto se trabaja en 4 frentes: la optimización logística, configuración de flota, gestión de flota y conducción eficiente. Actualmente existe una tendencia que apunta a trabajar con cadena de suministros eficientes energéticamente y sustentables a nivel económico y ambiental.

Para estudiar el transporte de forma cuantitativa sirve como punto referencia utilizar una variable para cuantificar el trabajo físico realizado. La unidad tonelada-kilómetro [ton.km] representa el peso de una carga por la distancia que se transporta. Homólogo es la variable pasajero-kilómetro [pas.km] que representa la cantidad de personas. El transporte de mercancías se mide en tonelada-kilómetro mientras que el transporte de pasajeros en pasajero-kilómetro. Partiendo de esta variable se puede generar cálculos sobre el consumo de energía de la flota o el tipo de vehículos para abordar cierta tarea. Hay que considerar también que la distribución en el tiempo de esta cantidad define la forma en que debe suministrarse energía para satisfacer la demanda. Según cada flota además se imponen exigencias al modo de transporte, pueden ser de carácter tecnológico, político, seguridad o dado características especiales de la operación. Por ejemplo, el número máximo, en caso de taxis es 4 pasajeros mientras que para buses puede superar los 50 pasajeros.

Desde el punto de vista de cada actor las necesidades del transporte son distintas. Se vuelve importante la selección de vehículos que permitan transportar una mayor cantidad de peso o volumen con el menor

costo posible cumpliendo con los requerimientos extra. Por ejemplo, el tiempo de entrega, el peso y el volumen de la carga, consideraciones de seguridad extra para cargas frágiles, peligrosas o valiosas. Por otro lado, las flotas de transporte de pasajeros ajustan por precio para la prestación de un servicio. También. Cada flota responde a las necesidades del público general o un grupo específico de personas. Las consideraciones de calidad de servicio, tiempos de servicio, seguridad, nivel de confort, entre otras vienen dadas por la legislación vigente y por la opción del servicio. (OTUC, 2016)

### 2.2.2 Flotas comerciales eléctricas en Chile

A continuación, se presentan algunos casos de flotas eléctricas en Chile, Latinoamérica, EE. UU. y Europa.

#### *NAMA<sup>2</sup> Zona Verde para el Transporte en Santiago Chile*

La NAMA Zona Verde es una iniciativa nacional para mitigar emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte urbano de pasajeros en Santiago. Esta iniciativa vincula a la I. Municipalidad de Santiago (IMS), Ministerio de Transportes (MTT) y Ministerio del Medioambiente (MMA). En diciembre de 2015 comenzó la operación de 3 taxis eléctricos BYD modelo e6 y 1 bus eléctrico BYD modelo K9 que se sumó al proyecto en mayo de 2016. La operación de estos 4 vehículos conformó el piloto que buscaba estudiar el desempeño de vehículos en operación real en la ciudad para así estimar como se integrarían de forma masiva a las flotas de transportes público. Los taxis fueron integrados en la flota de taxis de la empresa Transportes Santa María, recorriendo en promedio 99 [km/día]. Por otro lado, el bus eléctrico operó en un recorrido diseñado especialmente, registrando un nivel de actividad de 40 [km/día] en promedio. A continuación, se presentan fotos del bus eléctrico y de uno de los taxis eléctricos de la NAMA Zona Verde para el transporte en Santiago.



Figura 6 Bus eléctrico municipal BYD k9 NAMA Zona Verde.

---

<sup>2</sup> NAMA: Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada

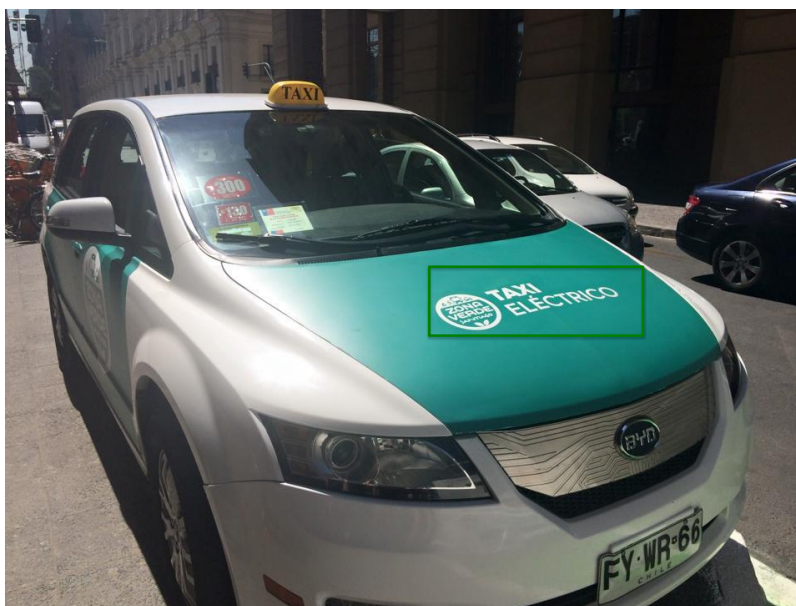


*Figura 7. Taxi eléctrico BYD e6 NAMA Zona Verde*

### ***Aguas Andinas***

Un ejemplo destacable de vehículos eléctricos en flotas comerciales es Aguas Andinas, que desde el 2015 incorporó 3 furgones Renault Kangoo Z.E. a su flota operativa. Estos vehículos transportan personal y equipo para faenas de atención a clientes y mantenimiento, entre otras. La inclusión de estos vehículos se enmarca en el esfuerzo de la compañía por contribuir al desarrollo sostenible. Poniendo foco en operaciones eficientes y respetuosas por el medio ambiente, forman parte del plan de Ecoeficiencia: Medidas de eficiencia energética. La participación de estos vehículos en su flota operacional se entiende desde una economía circular considerando su alta eficiencia y la posibilidad que estos funcionen con energía generada con el proyecto de cogeneración de su planta de tratamiento Mapocho Trebal (Aguas Andinas, 2016).



*Figura 8. Vehículo operativo de Aguas Andinas, Renault Kangoo Z.E.*

## CCU Chile

Otro ejemplo chileno es CCU con su recién estrenada flota inicial de camiones eléctricos (de propiedad de la Empresa de Transportes Rubén Martínez). El primer paso presentado en agosto de 2017 considera 4 camiones y la empresa prevé reemplazar su flota operativa en Santiago Centro (16 vehículos). Estos son más pequeños de los camiones que reemplazarán, lo que entrega a su operación la facilidad para moverse en el centro de Santiago y mover la mercancía a nivel peatonal. Este proyecto se enmarca en la iniciativa al cuidado del medio ambiente de la empresa. (CCU, 2017)

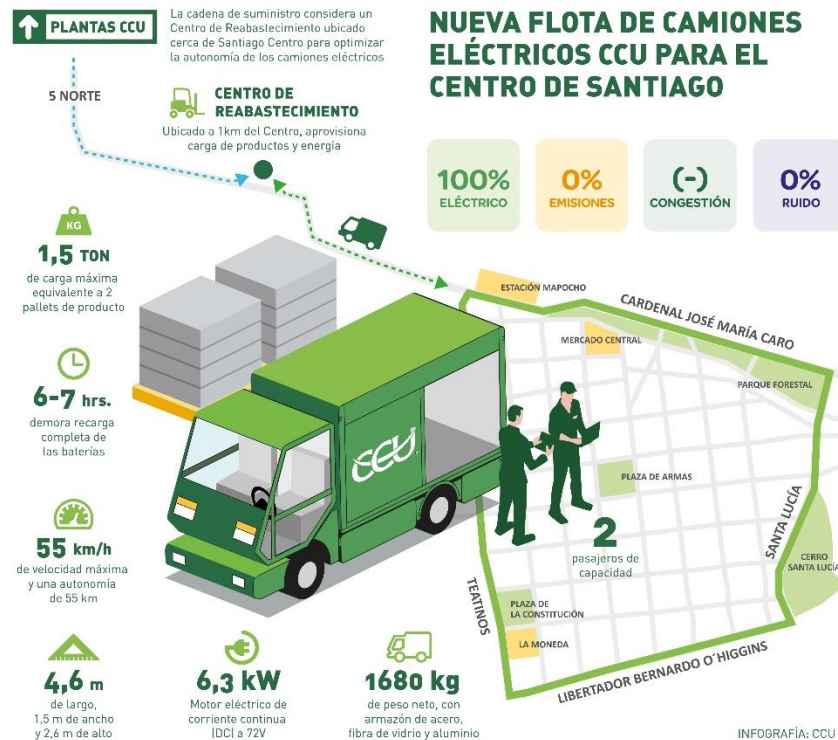


Figura 9. Infografía de proyecto de camiones eléctricos CCU.

### 2.2.3 Flotas comerciales eléctricas en el extranjero.

#### Le Groupe La Poste Francia

Durante más de 10 años, esta empresa nacional de correos en Francia se ha comprometido con una política de desarrollo sostenible y hoy posee una flota de más de 35.000 vehículos eléctricos de una flota total de 75.000 vehículos, entre camiones, automóviles, quads, triciclos y bicicletas (Fleet Europe, 2017). Como referencia los automóviles y quads eléctricos de La Poste dan 5 vueltas a la tierra. También presenta una política de investigación y desarrollo para contribuir al desarrollo de los vehículos del futuro, que en este momento está probando autos y bicicletas propulsadas por hidrógeno. Esta empresa se propone 3 objetivos, ser operador de referencia de la industria en cuanto a logística urbana responsables, reducir 20% de sus emisiones entre 2008 y 2020 y finalmente mejorar las condiciones de sus trabajadores (Le Groupe La Poste, 2018).



*Figura 10. Ejemplos de la flota eléctrica de Le Groupe La Poste.*

### ***FedEx Internacional***

Esta compañía área y logística internacional de origen estadounidense, dentro de su política de sustentabilidad establece minimizar el impacto al medio ambiente, al mismo tiempo de proveer el mejor servicio. Con su programa EarthSmart agrupa iniciativas que, siendo negocios tangibles, tienen beneficios ambientales. Dentro de las innovaciones impulsadas por el programa está el compromiso de que tanto servicio con activos de la empresa cumplan con estándares cuantificables de sostenibilidad ambiental. Entre los ejemplos de FedEx Global EarthSmart Solutions se incluyen los triciclos eléctricos asistidos que operan en París, los camiones híbridos y todos los vehículos eléctricos que FedEx emplea en los principales centros urbanos, incluidos París y Londres (FedEx, 2017).

### ***Correios Brasil***

Un caso de electro movilidad implementado en Latinoamérica es con Correios, empresa nacional en Brasil que realiza el servicio correspondencia y entrega de encomiendas. Dentro de su política para reducir emisiones de CO<sub>2</sub>, esta compañía generó a principios del 2016 una alianza con la empresa china BYD para probar el modelo eléctrico T3, enmarcado en su programa “Green Logistic Solution” (BYD, 2016) y en las mejoras urbanas que impulsó Brasil en el marco de las Olimpiadas, donde Correios era uno de los auspiciadores oficiales. Este vehículo tiene una autonomía de 200 (km) y actualmente la empresa BYD tiene una planta de fabricación ubicada en Campiñas, a las afuera de Sao Paulo.



*Figura 11. Vehículo eléctrico Correios BYD T3*

## 2.3 ESTUDIOS DE DESEMPEÑO

El desempeño es el acto de cumplir una obligación, en el caso de este estudio la obligación de transportar que debe cumplir el vehículo. Este estudio de desempeño analizará las características importantes en ese acto de cumplir, en otras palabras, estudiar que tan bien se ajusta la máquina a las necesidades que busca satisfacer. En esta sección se presenta los aspectos generales que se debe tener en consideración para abordar un estudio de desempeño vehicular, la definición de potencia específica vehicular (VSP) y cómo relacionar la VSP con la energía.

### 2.3.1 Aspectos generales

Los aspectos importantes de un estudio de desempeño pueden abrirse en un abanico muy extenso, desde lo micro a lo macro, desde lo teórico a lo práctico o desde lo cuantitativo a lo cualitativo. Por ejemplo, puede estudiarse el desempeño de una parte de un vehículo o el desempeño de muchos vehículos integrados en una flota, puede estudiarse el desempeño de un diseño de vehículo no producido o de un vehículo en operación real o puede estudiarse el desempeño midiendo variables físicas y también evaluando percepción de los conductores y pasajeros. Para realizar un estudio de un vehículo en movimiento y en particular de un vehículo eléctrico se debe caracterizar la operación, definir indicadores y variables del estudio y medir, calcular o estimar dichas variables.

Existen muchas características que pueden ser relevantes a la hora de estudiar el desempeño del vehículo o vehículos de estudio. Estas pueden ser el peso de vehículo, potencia máxima, autonomía máxima, capacidad de carga o de pasajeros, servicios auxiliares y de comodidad, entre otros.

Respecto de la operación, generalmente se estudian variables físicas como la velocidad, la aceleración, la altitud, la potencia específica y la energía usada en un periodo de tiempo para posteriormente obtener resultados sobre eficiencia, autonomía máxima, velocidad de circulación, entre otras variables que permitan evaluar el desempeño.

Para la medición de algunas variables existen varias formas de registrar datos operacionales, con métodos invasivos y no invasivos; se puede registrar datos de movimiento del vehículo dotándolo con un equipo de seguimiento de GPS de forma no invasiva o conectarse al computador del vehículo para obtener registros del protocolo de diagnóstico a bordo (OBD2: On board diagnostics) o incluso, midiendo de manera directa la corriente que circula por el circuito eléctrico. El trabajo con un equipo de seguimiento de

GPS permite captura de datos de posición geo-referenciada, velocidad instantánea, aceleración instantánea y altitud con un intervalo de tiempo entre cada registro deseado. Dado que el movimiento de los vehículos tiene aceleraciones y frenadas del orden de la reacción de los conductores el tiempo entre cada captura debe ser al menos del mismo orden de magnitud o el menor posible.

El terreno en el que se mueven los vehículos es otro parámetro importante. Las características de la geografía como también el diseño de una ciudad y las condiciones de tránsito influye en las exigencias para el vehículo. Al momento de diseñar un estudio se debe definir las rutas sobre las que se moverá, ya sea por una ruta específica o con libertad para recorrer diferentes rutas. Por ejemplo, en una pista cerrada, en una calle, un grupo de calles, una ciudad. También se requiere de la altitud para determinar la inclinación o ángulo de inclinación de una ruta. La inclinación se define como el arco tangente de la pendiente o como se muestra en la Ecuación 1.

$$\text{Inclinación} = \tan^{-1} \left( \frac{dy}{dx} \right) = \tan^{-1}(m)$$

*Ecuación 1. Inclinación*

También se requiere información de las principales características de los vehículos estudiados. Ejemplos de características importantes para EVs son el tipo, capacidad y voltaje de la batería, la velocidad máxima, la potencia máxima, la autonomía y el peso del vehículo. Para los vehículos de combustión interna es importante saber el peso del vehículo, el tipo y tamaño del motor, la autonomía y el rendimiento. Estas características generalmente son indicadas en las fichas técnicas de los vehículos.

Para poder estudiar las variables energéticas de un vehículo, se debe pensar en el modelo de un objeto móvil. En un cuerpo puntual podemos ver las variables energéticas de una partícula en movimiento, y para esto se usa los modelos clásicos de la mecánica que contempla energía cinética, potencial y esfuerzos exteriores. Para un vehículo la energía cinética y potencial se determina con la velocidad y la posición y por otro lado como esfuerzos exteriores pueden considerarse el roce del aire y el roce del vehículo con el pavimento. Ahora, si consideramos el vehículo como un cuerpo, podemos también considerar el flujo de energía que ocurre desde la entrada a este vehículo y como se genera un trabajo para usar esa energía. En el caso del vehículo eléctrico recibe energía desde su cargador y es usado para generar el trabajo en las ruedas y en un vehículo de combustión interna la energía es proporcionada por el combustible, que luego de todos los procesos internos se transforma en trabajo efectivo de las ruedas, habrá que considerar además las pérdidas de por el roce de las piezas internas del vehículo.

Dado que el vehículo se mueve en una trayectoria lineal se asume un modelo bidimensional del movimiento del vehículo, el cual se mueve hacia arriba, abajo y de frente, es decir no se consideran los esfuerzos de movimientos como virajes.

### 2.3.2 Potencia específica vehicular

La potencia específica vehicular (VSP, vehicular specific power) es una cantidad intensiva que representa la potencia requerida por un vehículo dividido por unidad de masa. Dado que la potencia es una cantidad extensiva al dividir por la masa del vehículo, la potencia específica vehicular se convierte en una cantidad intensiva. La VSP está modelada como la suma de la variación de la energía cinética y potencial en un periodo de tiempo y las potencias ejercidas por fuerzas internas y de superficie. El beneficio de trabajar con esta variable es que normaliza la potencia por unidad de masa permitiendo aplicar el mismo método para vehículos de distinta masa.

En específico, la VSP es la suma de la potencia cinética instantánea, la potencia instantánea ejercida por la energía potencial, la potencia ejercida por las fuerzas de resistencia a la rodadura, la potencia ejercida por la fuerza de roce del viento y las fuerzas de roce mecánico o roce interno. La ecuación que representa matemáticamente lo anterior es la siguiente

$$VSP = \frac{Potencia}{Masa} = \frac{\frac{d}{dt}(E_{Cinética} + E_{Potencial}) + F_{Rodadura} \cdot v + F_{Aerodinámica} \cdot v + F_{Roce\ Mecánico} \cdot v}{m}$$

*Ecuación 2. VSP, potencia específica vehicular*

Esta ecuación se puede desarrollar para definirla en término de las variables velocidad, aceleración y pendiente, siendo constantes, la masa del vehículo, el factor de masa traslacional, la aceleración de gravedad, el coeficiente de rodadura, la densidad del aire, el área frontal del vehículo, el coeficiente de roce aerodinámico, la velocidad del viento y el coeficiente del roce mecánico. Dada estas consideraciones la ecuación de la VSP se puede escribir como sigue.

$$VSP \approx v \cdot a \cdot (1 + \varepsilon_i) + g \cdot pendiente \cdot v + g \cdot C_R \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot \frac{A}{m} (v + v_m)^2 \cdot v + C_{RM} \cdot v$$

*Ecuación 3. VSP desarrollada para encontrar variables de estudio y constantes.*

La determinación de algunas de las constantes es técnicamente compleja. El factor de masa traslacional aproxima una masa equivalente para las inercias de cuerpos rotatorios al interior del vehículo como si estas tuvieran un movimiento lineal. El coeficiente de rodadura depende del neumático del vehículo, sus cualidades de fábrica, el desgaste y la presión de aire. El coeficiente de roce aerodinámico depende de la forma del vehículo y su superficie. El coeficiente de roce mecánico depende de los contactos de todas las partes móviles del vehículo. Todos estos coeficientes han sido aproximados para distintos tipos de vehículos en estudios anteriores y para efectos de un cálculo ingenieril se han propuesto valores típicos para poblar la ecuación de la VSP. Se considera la velocidad del viento en contra o a favor del movimiento del vehículo, aunque se sabe que puede generar cambios importantes en los cálculos de la VSP es difícil estimar sus aportes en condiciones de movimiento real de un vehículo.

La cantidad VSP es utilizada para estimar emisiones vehiculares dado que proporciona un acercamiento a la potencia instantánea que tiene que entregar el sistema motor del vehículo. Existe el modelo IVE (International Vehicle Emissions) que calcula la emisión de contaminantes criterio basado en la VSP, logrando un perfil de requerimiento de potencia en función del tiempo con una discretización alta. La estimación de emisiones por ciclos de conducción o por velocidad constantes es menos precisa ya que aproxima la conducción real con un modelo muy simplificado. El modelo IVE estima los valores de los coeficientes para vehículos con motor de combustión interna y ocupa la siguiente ecuación para calcular la VSP en función de la velocidad, la aceleración y la pendiente.

$$VSP = v[1,1 \cdot a + 9,81 \cdot \tan^{-1}(\sin(pendiente)) + 1,32]$$

*Ecuación 4. Potencia específica vehicular según modelo IVE.*

El perfil de VSP en función del tiempo permite calcular la energía usada por los vehículos en un periodo. Si además se tiene datos obtenidos por un GPS o equipo de seguimiento de ruta es posible relacionar la VSP con condiciones de tránsito, rutas, pendientes, horarios de trabajo y además también estudiar el comportamiento de manejo.

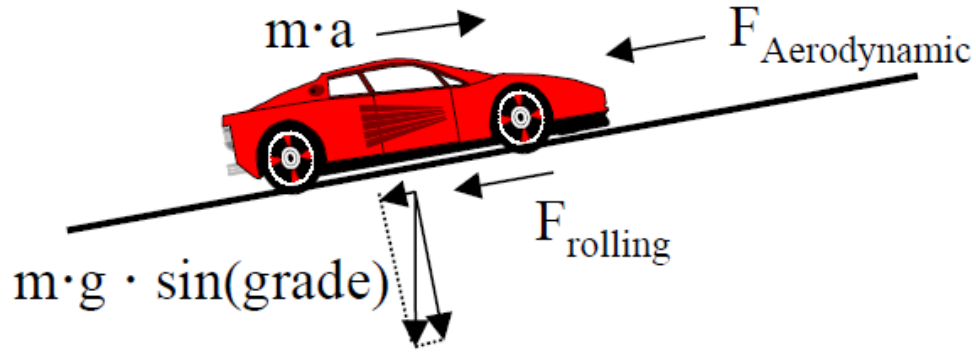


Ilustración 1. Diagrama de fuerzas del modelo de "Potencia específica vehicular". (Tolvet, 2009).

### 2.3.3 Energía

Al relacionar la VSP con el tiempo es posible integrar la curva para estimar la energía requerida por el vehículo en un periodo de tiempo. La cuantificación de la energía permite relacionar el desempeño con el consumo y el costo en energía para la operación.

$$Energía_{usada} = \int_{t=0}^{t=T} VSP * masa_{vehículo} * dt$$

Ecuación 5. Energía usada en el movimiento de un vehículo, a partir de la VSP en un periodo de tiempo

El consumo de energía por movimiento del vehículo es comparable con la energía suministrada a este para calcular la eficiencia del vehículo. La energía suministrada debe ser mayor a la energía ocupada para el movimiento, la diferencia se debe a pérdidas de todo el sistema y consumos de energía de sistemas adicionales como climatización, navegación o entretenimiento.

$$eficiencia = \frac{energía\ usada}{energía\ suministrada\ al\ vehículo}$$

Ecuación 6. Calculo de la eficiencia de un vehículo.

La energía que se logra almacenar en un vehículo se relaciona directamente con la autonomía de este, por lo que calcular la energía usada permite estimar tanto el rendimiento como la autonomía máxima del vehículo. Es importante tener en consideración la temperatura de funcionamiento para un vehículo eléctrico ya que las baterías son susceptibles al frío y por tanto corresponde analizar la temperatura durante los días de las pruebas. Aunque, considerando que si las pruebas se realizan en ciudades o zonas sin temperaturas extremas, se puede considerar que las pruebas se realizaron en condiciones donde la temperatura externa no afectó de forma significativa los resultados. Por otro lado, la inclinación del terreno es importante dado que el consumo de energía es mayor en zonas de inclinación positiva. Si bien este aspecto es una condición fija, es importante tomar en consideración esta exigencia para un vehículo al realizar una prueba o estudiar su operación. Otra variable que interviene en el flujo de energía en un vehículo eléctrico es el uso de los servicios auxiliares como la radio, la calefacción, el aire acondicionado u otros equipos que consuman energía del vehículo. La importancia del uso de los servicios auxiliares se da porque todo consumo de energía que no es usada para movimiento puede ser considerada como una pérdida (Tolvet, 2009).

### 3 METODOLOGÍA

---

En este capítulo se presenta la metodología general de este trabajo de título. Consiste en la descripción de las actividades de recolección de información y análisis. Primero se presenta el diseño de la campaña de medición y levantamiento de información, luego describe como serán procesados los datos brutos y finalmente cuales son los principales análisis por realizar.

#### 3.1 DISEÑO DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

En esta sección se presenta el diseño de la campaña de medición, los aspectos importantes de medir y de qué forma estos aportan al entendimiento del problema y a evaluar el desempeño de los vehículos eléctricos en una flota vehicular comercial. Luego se presenta la metodología para el procesamiento de los datos recolectados.

El objetivo de la campaña de medición es obtener información y consideraciones importantes para analizar la flota de la empresa y el reemplazo a tecnología eléctrica. Se define 2 tipos de levantamiento de información:

- Se solicita a la empresa la información que permita caracterizar la flota y la operación, para conocer el tamaño de la flota y el tipo de vehículos que operan para la firma.
- Se miden parámetros operacionales y energéticos de la operación de los vehículos para analizar el desempeño de los EVs operativos de la flota. El desempeño de los vehículos se analiza en cuanto a su eficacia, estudiando información sobre la característica de la operación y el cumplimiento de sus propias metas. Y se analiza en cuanto a su eficiencia, estudiando el uso de recursos energéticos y monetarios para lograr sus objetivos operaciones.

Esta campaña de medición esta centrada en el estudio de la flota de operación que está integrada por furgones, en su mayoría Peugeot Partner HDI, que en adelante nombraremos como ICV (vehículo de combustión interna) y además por 3 Renault Kangoo Z.E., que en adelante nombraremos como BEV (vehículo eléctrico de baterías).

##### 3.1.1 Caracterización de la flota del Grupo Aguas

La caracterización de la flota exige información de gestión de la flota, la que es solicitada directamente. Se solicitó información para caracterizar la flota de Aguas Andinas, y poder entender el tamaño de la flota, su operación, las tareas que cumplen sus vehículos, las necesidades generales a las que se enfrenta la flota y los tipos de vehículos que satisfacen las necesidades. A continuación, se lista la información solicitada.

1. Base de datos de vehículos de la flota: Una base de datos de vehículos que permita entender el número de vehículos de la flota, el tipo de vehículos que tiene la flota, la labor que cumple cada uno de los modelos, la edad promedio de los vehículos, el costo para la empresa, entre otros.
2. Base de datos de vehículos candidatos a reemplazo por tecnología eléctrica: Una selección de los vehículos que podrían ser reemplazados por vehículos eléctricos.
3. Tarifas eléctricas de los centros operacionales.
4. Información general y costos de leasing de la flota.

## 5. Modelos de vehículos candidatos.

La información fue solicitada directamente por Cristian Acevedo, director de Gestión de flota, el que respondió compartiendo la planilla “Análisis Kilometrajes 2017”.

Adicionalmente se cuenta con información del estudio “Evaluación de impactos y beneficios asociado a reemplazo de flota vehicular convencional por vehículos eléctricos” para la empresa Aguas Andinas, presentado por Sistemas Sustentables (Sociedad Consultora, Ltda.) en diciembre de 2016. Este estudio fue encargado por Cristian Acevedo para evaluar el posible recambio de vehículos eléctricos para el proceso de licitación de flota operacional 2017.

### 3.1.2 Medición de la operación real

Para este estudio las condiciones de operación corresponden a la labor diaria que realiza cada vehículo, es decir el vehículo se moverá de acuerdo con las funciones asignadas por la empresa. Específicamente, cada vehículo se moverá por Santiago, por rutas no definidas. Éste tendrá un lugar de aparcamiento definido y una zona de cobertura no exclusiva. El interés de este estudio es comprender de mejor manera el funcionamiento real del vehículo en condiciones normales, para de esta forma estimar el comportamiento de una flota masiva de vehículos eléctricos.

Para entender la operación real de los vehículos es necesario medir ciertos parámetros que permita evaluar dicha operación. Para esto se instaló un equipo de registro de datos (data logger) en el vehículo. Se ocupó equipos llamados VAM Unit o indistintamente VAM y sus características son detalladas en la subsección 3.1.3. De forma simple, una VAM registra información de la actividad de los vehículos en cada segundo, registrando la información en un archivo de texto (.txt).

La medición de la operación real el año 2016 consistió en la instalación de una unidad VAM en un vehículo eléctrico (BEVA) y un furgón diésel (ICVA). En la campaña del año 2017 los vehículos estudiados son 2 Renault Kangoo Z.E (BEV1 y BEV2) y 1 Peugeot Partner HDI (ICV1) y una camioneta Toyota Hylux (ICV2). El furgón Partner y la camioneta Hylux fueron seleccionados como vehículo ICV que realiza en teoría las mismas tareas en el mismo y centro de operaciones. Con esto se busca estudiar los parámetros operacionales de cada vehículo, pero además comparar un BEV y un ICV. En específico se midió los Renault Kangoo Z.E. placas patentes HWPF-36 (en 2016 es BEVA y en 2017 es BEV1) y HWPF-35 (BEV2) y 1 Peugeot Partner HDI placa patente HVPX-72 (ICV1) y una camioneta Toyota Hylux placa patente HBHD-96 (ICV2). Para cada vehículo se mide un periodo de 7 días. Se realiza la siguiente codificación para nombrar a los vehículos estudiados

*Tabla 2. Identificación de los vehículos estudiados.*

| Nombre código | Modelo                  | Placa   | Centro Operacional   |
|---------------|-------------------------|---------|----------------------|
| <b>BEVA</b>   | Renault Kangoo Z.E.     | HWPF-36 | Lo Prado             |
| <b>ICVA</b>   | Peugeot Partner HDI 1.6 | HZVD-57 | Lo Prado             |
| <b>BEV 1</b>  | Renault Kangoo Z.E.     | HWPF-36 | Lo Prado             |
| <b>ICV 1</b>  | Peugeot Partner HDI 1.6 | HVPX-72 | Lo Prado             |
| <b>BEV 2</b>  | Renault Kangoo Z.E.     | HWPF-35 | Edificio Corporativo |
| <b>ICV 2</b>  | Toyota Hylux            | HBHD-96 | Edificio Corporativo |

Para la puesta en marcha de las unidades VAM, se probó las antenas y que cada unidad VAM registrara los datos en su tarjeta de memoria. Cada prueba duró 6 horas y se realizó un día antes de equipar los vehículos. Cada vez que se instaló una VAM en un vehículo, la batería fue cargada desde antes de las 20:00 horas de la noche anterior hasta las 06:00 horas del día de instalación. Se midió solo dos vehículos a la vez de cada centro operativo. Cabe mencionar que se configuró las unidades VAM para crear 1 archivo de texto cada día de medición.

### 3.1.3 Equipos de medición, unidades VAM

En esta subsección, se presenta las principales consideraciones para seleccionar un equipo de medición y la descripción de la unidad VAM utilizada para el estudio.

Existen equipos de medición de seguimiento de vehículos de diversas tecnologías. Una de las características importantes tiene que ver con el método de recolección de los datos registrados. Mientras algunos permiten acceder a los datos mediante una red inalámbrica, que facilita por ejemplo la gestión de una flota en tiempo real, otros equipos requieren de una conexión física para la recuperación de los datos y los acumulan hasta que estos son recolectados. Otro aspecto que considerar es el tiempo entre cada medición, es decir la discretización de los datos. Independiente de los alcances de un estudio la discretización debe ser coherente con la capacidad de análisis y con los objetivos esperados. Dado que se busca estudiar en detalle la forma en que un vehículo eléctrico gasta energía mientras se mueve y por lo que es deseado que los datos recopilados tengan el menor tiempo entre cada medición. Adicionalmente, se debe considerar el costo de la medición y que este sea coherente con los recursos del estudio. En este caso el costo de la medición debe ser el menor posible ya que no se cuenta con recursos extra para contratar un servicio de seguimiento de flota.

Dadas las consideraciones mencionadas anteriormente, se define utilizar para la recolección de datos una unidad VAM, “Vehicle activity monitor”, desarrollado por ISSRC<sup>3</sup>. La unidad VAM es un equipo de registro de datos autónomo, con batería recargable que realiza el registro de información captada por sus sensores en cada segundo. Esta unidad fue diseñada para estudios de este tipo, se la equipó con acelerómetro, barómetro, sensor de GPS y un software que permite el registro de fecha, hora, latitud, longitud, número de satélites conectados, velocidad, altitud determinada por presión, VSP, BIN de potencia, litros de combustible equivalente al VSP. Se nombrará una “entrada” al registro por segundo de estos 10 campos. Además, una unidad VAM debe conectarse con una antena de GPS para el registro de los datos. En la Figura 12 se muestra una VAM y la antena usada en conjunto para la recolección de datos. Este equipo fue facilitado por el profesor Mauricio Osses para la realización del estudio. La VAM cumple con las necesidades previstas del estudio y además dado que su uso no tiene costo.

---

<sup>3</sup> International Sustainable Systems Research Center (ISSRC, s.f.)



Figura 12. VAM Unit Vehicle Activitie Monitor (Izq.) y Antena GPS convencional (Der.)

La unidad VAM registra estos campos en un archivo de texto que queda almacenado en la memoria interna del equipo. Para obtener la información basta conectar la unidad con un computador a través de un cable de red y descargar el archivo, siguiendo la guía VAM Instruction Booklet (ISSRC, 2011).

### 3.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS RECOLECTADOS

A continuación, se presenta la metodología para la recepción, almacenamiento y orden de los datos.

En el caso de la información para la caracterización de la flota, fue recibida mayormente procesada. No obstante, se construyó gráficas para poder visualizar de forma directa los datos recibidos. Además, se realizó un resumen de las entrevistas.

Para el caso de las mediciones de la operación real, gracias a las características de las unidades VAM este proceso se realizó de manera simple y sistemática. De cada unidad VAM se extrajo 1 archivo por día de medición. Estos archivos fueron ordenados por vehículo. Posteriormente, los archivos de texto fueron exportados a planillas de cálculo de Microsoft Excel (extensión .xlsx) ocupando el asistente para importar texto, se construyó planillas de cálculo donde se acumuló las entradas de datos los vehículos, los nombres de los archivos son *Datos\_brutos\_BEV#\_VAM\_###* y *Datos\_brutos\_ICV#\_VAM\_###*. A continuación, se muestra el interfaz del asistente para importar texto.

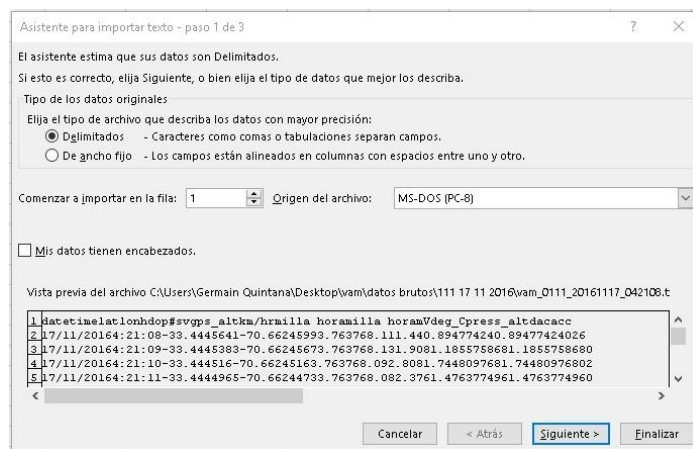


Figura 13. Interfaz del asistente para importar texto a una planilla Microsoft Excel

Las planillas de Microsoft Excel, en adelante, las planillas, permiten organizar los datos en celdas ordenadas. Una fila representa una entrada y en cada celda de la fila se acumulan la información registrada por cada unidad VAM. Gracias a las funciones lógicas fue posible filtrar las entradas, operar datos y construir gráficos para visualizar las tendencias de la información y realizar análisis estadísticos. Para un manejo más intuitivo de las planillas se agregó dos campos para actualizar la fecha y la hora en el territorio chileno.

Los datos descargados fueron seleccionados desde las 8:00:00 del día de instalación hasta las 08:00:00 del día de retiro. Esto evita falsear los datos, eliminando del registro el movimiento de la unidad VAM independiente de los vehículos de estudio.

### 3.3 ENTREGAS A LA EMPRESA AGUAS ANDINAS.

Como parte de este trabajo de titulación se requiere entregar a Aguas Andinas el estudio “Evaluación de impactos y beneficios asociado a reemplazo de flota vehicular convencional por vehículos eléctricos 2017”, siendo este una actualización del estudio realizado el 2016. Cabe mencionar que el levantamiento de este requerimiento es el que da razón de ser a este trabajo de título. Se entregó a la Empresa Aguas Andinas un informe del estudio y una copia digital de los documentos anexo y planillas de cálculo. A continuación, se presenta los títulos del informe y una breve descripción de cada uno. Este documento se presenta en el Anexo 1.

1. Introducción: Se da cuenta del estado actual del proyecto de electromovilidad de aguas andinas, presentando un resumen de estudio y sus principales resultados.
2. Aspectos técnicos: Se presenta la composición de la flota de Aguas Andinas y las definiciones del proyecto de reemplazo de vehículos eléctricos.
3. Evaluación económica: Se presenta de los parámetros y supuestos para la evaluación económica, un análisis comparativo de un BEV y un ICV de la flota operativa para finalmente presentar el análisis del costo del proyecto.
4. Impactos en emisiones contaminantes y huella del agua: Se presenta del impacto en emisiones contaminantes y huella del agua, se presenta el potencial de reducción de emisiones de gases contaminantes y huella del agua, una propuesta para la mejora de imagen y el desarrollo de capacidades técnicas.
5. Propuesta de contenidos para difusión: Se presenta, en un formato ejecutivo, los resultados del estudio de evaluación.
6. Conclusiones
7. Anexos

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En la sección 4.1 se presentan información obtenida de forma directa por Aguas Andinas y posteriormente en la sección 4.2 se presenta los resultados de la medición de la operación real y finalmente el análisis del desempeño de los vehículos en la sección 4.3.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FLOTA

En esta sección se presenta los resultados del levantamiento de información para la caracterización de la flota del Grupos Aguas.

La información solicitada fue respondida por Cristián Acevedo, coordinador de Gestión de Flota, con la planilla de cálculo llamada “Análisis Kilometrajes 2017.xlsx”. Esta planilla de cálculo tiene 9 hojas, las que caracterizan la flota del Grupo Aguas y las operaciones, cabe mencionar que esta planilla es producto del análisis realizado por Cristian Acevedo para el proceso de licitación 2018. El archivo entregado por la empresa se puede encontrar en los Anexo 1 y a continuación, se resume el contenido:

- Hoja Resumen Unitario: Esta hoja presenta un análisis de costo unitario para el reemplazo de vehículos eléctricos.
- Hoja Licitación: Se presenta el listado de vehículos que vencen contrato el 2017, en específico 84 vehículos.
- Hoja Din Res: Se presenta una tabla dinámica con la información de los vehículos que vencen su contrato el 2017.
- Hoja Maestro Combustibles: Se presenta el registro de las cargas de combustible de 580 vehículos desde enero a agosto de 2017.
- Hoja 3: Se presenta una tabla dinámica con la información de las cargas de combustible realizadas registradas en la hoja Maestro Combustibles.
- Hoja Resumen Km Sept 17: Se presenta el listado de vehículos que tienen leasing operacional analizando el kilometraje registrado hasta agosto 2017.
- Hoja Dist Normal LOP Completo: Se presenta el listado de 324 vehículos que tienen más de 6 meses desde el inicio de su contrato y el análisis de distribución normal.
- Hoja Dist Normal a Renovar: Se presenta el listado de 83 vehículos que tienen más de 6 meses desde el inicio de su contrato y el análisis de distribución normal. En este listado no se encuentra un vehículo de la filial Aguas del Maipo.
- Hoja Maestro a Octubre: Se presenta el registro de 1314 vehículos de la flota del grupo Aguas, con 34 campos de información. Cabe mencionar que esta hoja tiene la información completa y las otras hojas son el producto del procesamiento y análisis de esta hoja Maestro a octubre.

#### 4.1.1 Proyecto de electro-movilidad Aguas Andinas

Refiriéndose a la historia del proyecto cabe mencionar que el ímpetu por modernizar la flota se cimienta en un esfuerzo coordinado de la Gerencia general y de la Coordinación de gestión de flota por mejorar las condiciones laborales para los trabajadores, la seguridad de sus vehículos y la calidad del servicio entregado. En años anteriores el área de movilización de la empresa se guiaba por reducir costo y hacer la operación de la flota más barata. Con el tiempo otras consideraciones comenzaron a importar. Pasó a

ser importante la comodidad del personal que dedica su jornada a estar montado en un vehículo de la flota. Es una labor constante para el equipo de gestión de flota tener vehículos de cabina amplia y climatizada. También se considera que los vehículos cumplan con normas de seguridad actualizadas. Y, por otro lado, subir el estándar de calidad de los vehículos entrega una mejor confiabilidad en el servicio prestado.

En la búsqueda de nuevas alternativas se exploró el gas licuado como alternativa para el combustible en los años 2011 y 2012. En esos años la flota operativa estaba compuesta en gran parte por vehículos de gasolina y entonces el precio de este combustible volvía candidato al gas y al diésel. Una de las dificultades que enfrenta la empresa es el uso de suelo de sus centros operacionales, que por regulación no pueden tener surtidor de combustibles. Este impedimento obliga que la carga se realice fuera los centros operacionales. En esos años las estaciones de carga de gas licuado no eran suficientes para garantizar una óptima recarga de todos los vehículos de la flota. Luego del periodo de estudio los beneficios de los vehículos diésel sobrepasaron a los vehículos de gasolina, y hasta el año 2017 el grueso de la flota operacional está conformado por vehículos diésel.

Siguiendo con la tendencia de mejorar continuamente la flota operacional se abre el panorama para incluir nuevas tecnologías de motorización. En cuanto a los vehículos eléctricos el grupo Aguas busca ser pionero en el uso de BEVs para flota operacional. La empresa no tiene duda que el reemplazo de los vehículos contaminantes será una realidad en el futuro cercano y ser los primeros en Chile que realizan esta labor tendrá muchos beneficios para la compañía. Desde el punto de vista comercial el trabajo con los proveedores de leasing operacional permite incidir directamente en la oferta de BEV, y en las características de estos. Desde el punto de vista técnico, el plan piloto de 3 BEV ha generado un aprendizaje importante sobre como los vehículos cumplen con la labor destinada y cuáles son los requerimientos y cualidad que deben mejorar en las próximas renovaciones. Y, por último, desde el punto de vista cultural, ser los líderes en el uso de BEVs se alinea con el compromiso de la empresa por el desarrollo sustentable y genera en sus trabajadores y sus clientes el sentimiento de responsabilidad y cuidado de los recursos.

Otra consideración importante es como suministrar energía a la flota operacional. Como se mencionó anteriormente el reglamento de uso de suelo de los centros operaciones no permite almacenar ni tener surtidores de combustibles. Esto ha hecho que todos los vehículos dependan de un proveedor externo para recarga de combustible, este proveedor es Copec, quien además ofrece servicio para flotas comerciales de pago con tarjetas. En un escenario donde sea la electricidad la que mueva la flota, los cargadores serán instalados en cada uno de los centros operacionales, haciendo que el suministro de la energía se realice en las mismas dependencias de la empresa y permitiendo gestionar el precio de esta a través del contrato eléctrico de cada centro operacional. Existen centro operaciones con costos del kWh cercano a \$40 [CLP]. Este es un precio bajo comparado con el de un cliente domiciliario y generará que el gasto operacional de los vehículos sea más bajo.

El proyecto de actualización de la flota Aguas considera un recambio paulatino, teniendo en consideración la tendencia mundial por cambiar los ICVs por BEVs. En primer lugar, la empresa, definió que se reemplazarán 10 furgones Peugeot Partner HDI de las filiales Aguas Andinas y Aguas Cordillera. En otras palabras, el programa piloto de 3 vehículos eléctricos en la flota Aguas iniciado hace 3 años aumentará a 10 BEVs en la flota operativa.

En el marco del proceso de licitación 2017 se levanta la necesidad de buscar proveedores de leasing operacional que ofrezcan una alternativa de vehículos eléctricos a un precio competitivo. Para la evaluación 2016 se analizó el reemplazo por el modelo Renault Kangoo Z.E. sin embargo a la fecha no se tuvo avances para presentarlo como una alternativa concreta. Por lo mismo, se toma el modelo Citroën E-Berlingo ofrecido por el proveedor Hertz como el vehículo candidato para el reemplazo. Cabe mencionar que los vehículos de esta categoría ofrecidos son similares en prestaciones, es decir, en cuanto a autonomía, capacidad, velocidad máxima, potencia máxima, toque máximo, etc. los furgones eléctricos ofrecidos en el mercado chileno son similares para modelos del mismo año, por lo tanto, para la toma de decisión toma mayor importancia el costo de leasing operativo, el plazo del contrato y el servicio de posventa que ofrezca el proveedor.

Citroën es un fabricante que ha incursionado en electromovilidad hace cerca de 20 años, con ejemplos como el C15 Electricque, C25 y la primera versión la Berlingo de primera generación. Esta experiencia es un factor que agrega confianza al BEV estudiado para asumir el reemplazo de un ICV.

Refiriéndose a las características del BEV estudiado, cabe mencionar que la E-Berlingo cuenta con un motor eléctrico de potencia máxima de 67 [hp] y un torque máximo de 200 [Nm] que permite una velocidad máxima de 110 [km/h]. Su batería de ion litio tiene una capacidad de 22,5 [kWh] que le permite una autonomía de 170 [km] en un funcionamiento cero emisiones. Esta furgoneta tiene una capacidad de 3,3 [m<sup>3</sup>] y una carga máxima 1.292 [kg]. Todas estas consideraciones confirman que la E-Berlingo tiene las capacidades para asumir funciones como un vehículo operativo de la flota del grupo Aguas. Entre otras características destacables, el furgón E-Berlingo cuenta con un medidor de potencia que indica el estado de la batería y permite al conductor saber la potencia entregada por las baterías en tiempo real, ya sea en momentos de aceleración o freno. Además, cuenta con indicación del consumo de energía del sistema de climatización. También posee un sistema de ayuda de arranque en pendiente que le permite avanzar desde 0 en pendientes de hasta 25% con carga completa.

Para la evaluación 2016 se analizó el reemplazo por el modelo Renault Kangoo Z.E. sin embargo no se presentaron las condiciones para que el reemplazo fuera concretado. En el marco del proceso de licitación 2017 se levanta la necesidad de buscar proveedores de leasing operacional que ofrezcan una alternativa de vehículos eléctricos a un precio competitivo. Por lo mismo, se toma el modelo Citroën E-Berlingo ofrecido por el proveedor Hertz como el vehículo candidato para el reemplazo. Cabe mencionar que los proveedores no ofrecen regularmente furgones eléctricos.

Por otro lado, dada la poca oferta, los posibles vehículos que podrían participar en una licitación son similares en prestaciones, es decir, en cuanto a autonomía, capacidad, velocidad máxima, potencia máxima, toque máximo, etc. Los furgones eléctricos ofrecidos en el mercado chileno son similares para modelos del mismo año, por lo tanto, para la toma de decisión es de mayor importancia el costo de leasing operativo, el plazo del contrato y el servicio de posventa que ofrezca el proveedor.

Para referirse a las características del BEV estudiado, se presenta la Tabla 3 que muestra las especificaciones técnicas del Citroën E-Berlingo:

Tabla 3. Especificaciones técnicas Citroën E-Berlingo. Fuente: (Citroen, 2017)

| <b>Característica</b> | <b>Valor</b>          |
|-----------------------|-----------------------|
| Potencia máxima       | 67 [hp]               |
| Torque máximo         | 200 [Nm]              |
| Velocidad máxima      | 110 [km/h]            |
| Capacidad batería     | 22,5 [kWh]            |
| Autonomía             | 170 [km]              |
| Capacidad de carga    | 3,3 [m <sup>3</sup> ] |
| Carga máxima          | 1.292 [kg]            |

## 4.2 MEDICIÓN DE LA OPERACIÓN REAL DE LOS VEHÍCULOS

La medición de la operación real de los vehículos duró 7 días para cada uno en dos etapas, primero los vehículos del centro Operacional Lo Prado y luego los del edificio Corporativo. Esto se tradujo en 10 archivos de texto obtenidos de las VAMs en el año 2017, a los que se suman los 117 archivos recopilados en la campaña de medición del año 2016. Se logró obtener una proporción de datos válidos que representan el tiempo efectivo en que los vehículos estuvieron en movimiento. Adicionalmente se presentan el resumen de la medición de la operación realizada el año 2016 (BEVA y ICVA) para la versión 1 del estudio de impactos y beneficios para Aguas Andinas. Es importante mencionar que la medición del vehículo ICV1 fue fallida, dado que no se logró registrar información en la unidad VAM 129. La falla en la medición fue causada por el deterioro del conector de la antena GPS utilizado. Esta antena fue revisada y se intentó repararla sin éxito durante la noche del jueves 17/08/2017 y posteriormente la noche del 21/08/2017. Se presenta también la energía cargada para el periodo de medición leída del repetidor instalado previo a cada cargador. En la Tabla 4. Resultados de la medición de operación real. se presenta la información característica de los resultados de la medición.

Tabla 4. Resultados de la medición de operación real.

| Vehículo<br>(Placa patente) | Fecha de<br>medición<br>Inicio-Término | VAM     | Tiempo de<br>medición válida<br>hh:mm | N° de<br>registros<br>válidos | Energía<br>cargada<br>[kWh] |
|-----------------------------|----------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <b>BEVA<br/>(HWPF-36)</b>   | 14-23/11/2016                          | 135-111 | 23:03                                 | 83.036                        | 79,90                       |
| <b>ICVA<br/>(HBHD-57)</b>   | 14-23/11/2016                          | 134     | 7:43                                  | 27.830                        | No aplica                   |
| <b>BEV1<br/>(HWPF-36)</b>   | 16-23/08/2017                          | 135     | 06:43                                 | 24.224                        | 27,40                       |
| <b>ICV 1<br/>(HVPX-72)</b>  | 16-23/08/2017                          | 129     | Falla de registro                     |                               |                             |
| <b>BEV2<br/>(HWPF-35)</b>   | 09-16/10/2017                          | 111     | 04:07                                 | 14.871                        | 33,80                       |
| <b>ICV 2<br/>(HBHD-96)</b>  | 09-16/10/2017                          | 101     | 02:16                                 | 8.190                         | No aplica                   |

### 4.3 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LOS VEHÍCULOS

En la siguiente sección se muestra el análisis de los resultados obtenidos tanto del proceso de recolección de información de la flota y como de la medición de la operación real. Se caracteriza la operación de los vehículos de la flota, y con mayor detalle de los vehículos medidos. También se realiza un análisis energético de la operación de los vehículos medidos. Posteriormente, se muestra el análisis de las emisiones contaminantes. Y por último se realiza un análisis económico del proyecto de electrificación de la flota.

#### 4.3.1 Análisis de caracterización de la flota de Aguas Andinas

A continuación, se presenta la caracterización de la flota del Grupo Aguas, considerando los vehículos de la sociedad Aguas del Maipo, Gerencia General del Grupo Aguas y la sociedad Grupo Empresas Filiales, que en adelante se nombrará Flota del Grupo Aguas o Flota Aguas. Se estudió el archivo Análisis Kilometrajes 2017, en específico la hoja “Maestro a Octubre”.

La flota del Grupo Aguas presenta un total de 1314 vehículos en su flota. De los cuales están vigentes 561 y en estatus de devuelto 753 vehículos. Es decir, están operativos 561 vehículos mientras otros 753 han terminado su contrato con el Grupo Aguas al mes de octubre de 2017. De los vehículos vigentes solo 27 son de propiedad de la empresa mientras que los restantes 534 vehículos son arrendados con formato de leasing, en dos grupos: vehículos ejecutivos (72 vehículos) y, vehículos en renting (leasing operativo) general (462). En términos proporcionales la flota está constituida mayoritariamente por vehículos renting que representan el 88% del total, mientras que los vehículos ejecutivos y los vehículos propios son 8% y 4% respectivamente. Esta relación se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Distribución de vehículos de la flota del grupo aguas según su propiedad y la vigencia del contrato. (elaboración propia)

| Vigencia           |           |            |            | Total                   |
|--------------------|-----------|------------|------------|-------------------------|
| Propiedad          | Proveedor | Devuelto   | Vigente    | Proporción <sup>4</sup> |
| Ejecutivo          | EJE       | 33         | 40         | 6%                      |
|                    | HTZ       | 1          | 32         | 3%                      |
| Subtotal Ejecutivo |           | <b>34</b>  | <b>72</b>  | <b>8%</b>               |
| Propio             | Propio    | 19         | 27         | 4%                      |
| Subtotal Propio    |           | <b>19</b>  | <b>27</b>  | <b>4%</b>               |
| Renting            | GL        | 3          | 16         | 1%                      |
|                    | HTZ       | 329        | 264        | 45%                     |
|                    | REE       | 69         | 0          | 5%                      |
|                    | RYS       | 46         | 1          | 4%                      |
|                    | TAT       | 253        | 181        | 33%                     |
| Subtotal Renting   |           | <b>700</b> | <b>462</b> | <b>88%</b>              |
| Total General      |           | <b>753</b> | <b>561</b> | <b>100%</b>             |

Otra consideración importante es la edad de la flota y para comprender esta dimensión se presenta en la Figura 14 el gráfico de la cantidad de vehículos según su año de fabricación. La edad de los vehículos es de importancia dado que permite estimar el grado de deterioro de los vehículos. Desde otro punto de

<sup>4</sup> Proporción frente al total general de vehículos de la flota de Aguas Andinas.

vista es esperable que un vehículo más viejo tenga un menor rendimiento y a la vez una mayor emisión de gases contaminantes.

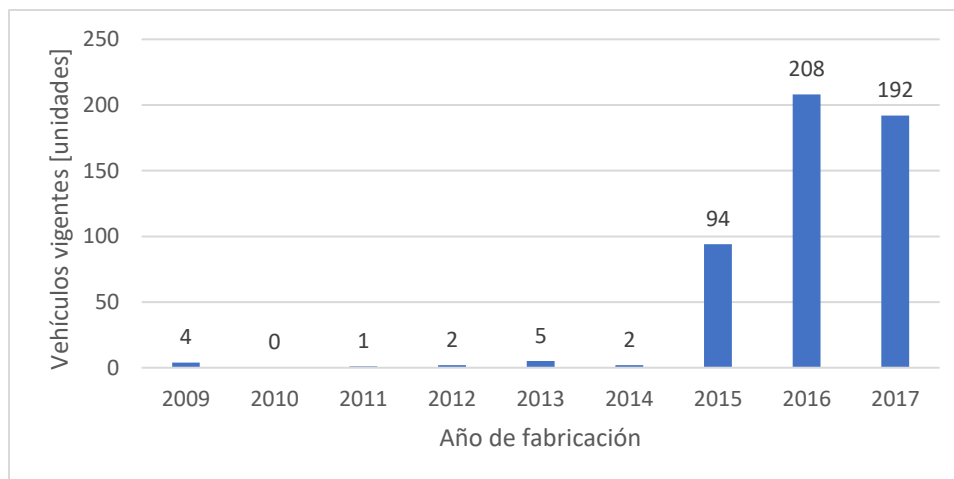


Figura 14. Cantidad de vehículos vigentes por año de fabricación.

Para analizar la flota meramente operacional se seleccionan solo los vehículos arrendados de la flota. Esta flota operacional está constituida en un 56% por furgones y en 42% por camionetas, los otros tipos de vehículos son mucho menores en proporción. Esto permite asumir que la flota está principalmente conformada por estos dos tipos de vehículos y los efectos de las otras categorías son marginales. Las categorías representan los siguientes grupos de vehículos. La categoría 1 conformada por camionetas cabina simple, la categoría 2 por camionetas doble cabina tracción 2x4, la categoría 3 por camionetas doble cabina tracción 4x4, la categoría 3B por camionetas 4x4 para aplicaciones mineras (A.M.), la categoría 4 por furgones pequeños, la categoría 5 por furgones medianos y finalmente la categoría 6 por camiones pequeños. En la Figura 15 se presenta de forma gráfica la proporción de la flota renting por clase de vehículos.

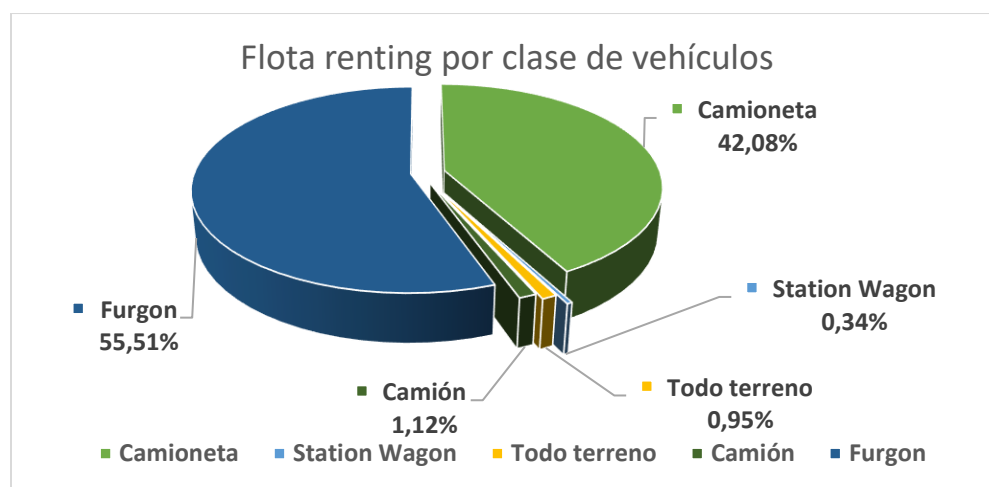


Figura 15. Proporción de vehículos de la flota renting por clase. (elaboración propia)

Pasando específicamente al grupo de vehículos que vencen su contrato en 2018 se presenta en la Figura 16 la proporción de los vehículos a licitar por categorías. Se debe licitar 84 [vehículos] que al 2016 estaban distribuidos de la siguiente forma: 3 vehículos de la categoría 1 (Volkswagen Saveiro), 18 vehículos categoría 2 (Chevrolet Dmax y Toyota Hylux), 7 vehículos de categoría 3 (Chevrolet Dmax y Toyota Hylux), 5 categoría 3B (Toyota Hylux), 34 furgones pequeños categoría 4 (Peugeot Partner) y finalmente 17 furgones medianos de la categoría 5 (Peugeot Expert).

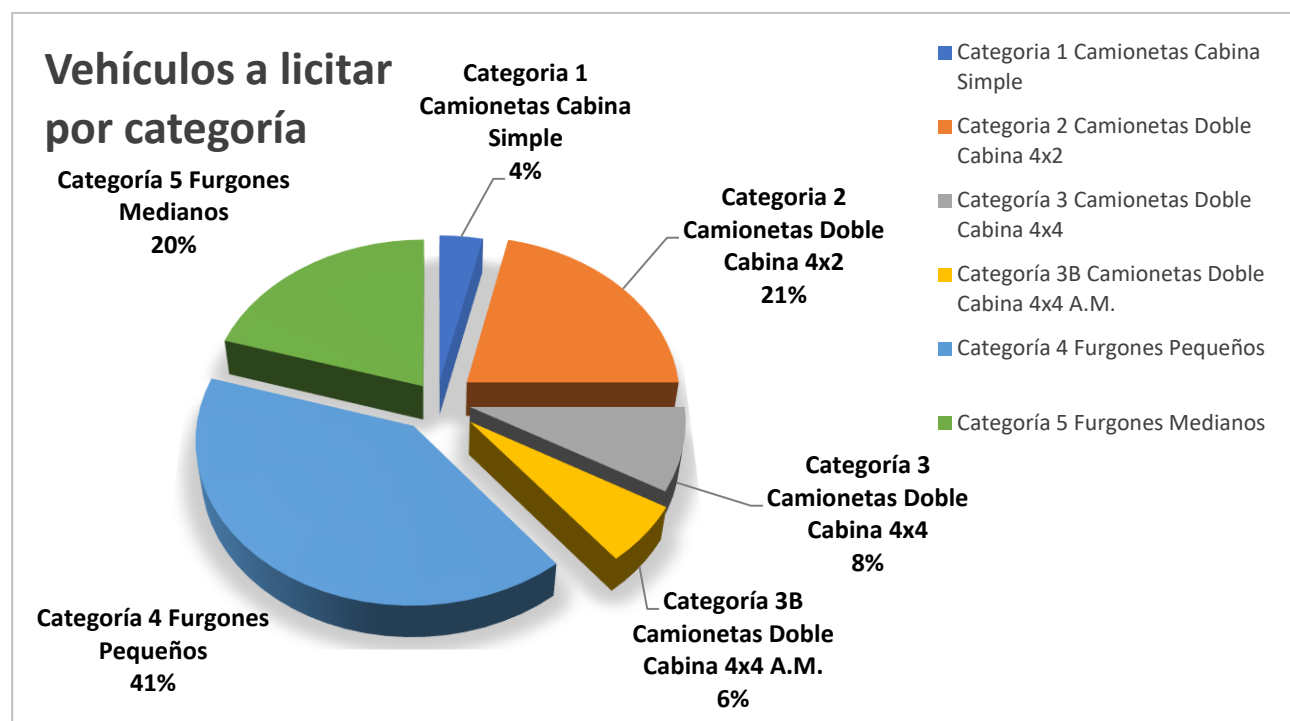


Figura 16. Proporciones de los vehículos para licitar según categoría.

Del total de los vehículos que se deben licitar para el periodo 2018, los candidatos para el reemplazo por vehículos eléctricos corresponden solo a los furgones que representan un 41%. Actualmente en Chile no hay alternativas para el reemplazo de vehículos eléctricos de las otras categorías. Para los 34 furgones que se deben licitar se estimó el nivel de actividad anual es de  $30.232 \pm 18.756$  [km/año] que equivale a  $86,87 \pm 51,39$  [km/día]. Este grupo de vehículos tiene un consumo de combustible anual proyectado promedio de  $2.032 \pm 1.163$  [lt/año.vehículo] que equivale a un gasto anual en combustible por vehículo de  $37 \pm 21$  [UF/año.vehículo] ( $990.555 \pm 566.806$  [CLP/año.vehículo]). En la Tabla 6. Nivel de actividad anual proyectado por categoría para los vehículos a licitar el 2018. se presenta el detalle del nivel de actividad proyectado para las categorías vehiculares de los 84 vehículos a licitar en 2018.

Tabla 6. Nivel de actividad anual proyectado por categoría para los vehículos a licitar el 2018.

| Nivel de actividad anual proyectado [km/año] |                                  |                 |        |                     |     |
|----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|--------|---------------------|-----|
|                                              | Tipo de vehículo                 | N° de vehículos | Media  | Desviación estándar | COV |
| <b>Categoría 1</b>                           | Camionetas Cabina Simple         | 3               | 27.281 | 9.697               | 36% |
| <b>Categoría 2</b>                           | Camionetas Doble Cabina 4x2      | 18              | 24.523 | 15.686              | 64% |
| <b>Categoría 3</b>                           | Camionetas Doble Cabina 4x4      | 7               | 29.717 | 28.829              | 97% |
| <b>Categoría 3B</b>                          | Camionetas Doble Cabina 4x4 A.M. | 5               | 24.865 | 8.795               | 35% |
| <b>Categoría 4</b>                           | Furgones Pequeños                | 34              | 30.232 | 16.340              | 54% |
| <b>Categoría 5</b>                           | Furgones Medianos                | 17              | 48.228 | 18.017              | 37% |
| <b>Total</b>                                 |                                  | <b>84</b>       |        |                     |     |

De la tabla 6 se puede ver que existe una diferencia entre las categorías y responde al tipo de funciones que cumplen. Es importante mencionar que las proyecciones tienen una alta desviación estándar, esto indica que algunos los vehículos se ocupan mucho y otros tienen un uso bajo. Se ve de forma numérica con el coeficiente de variación (COV) que supera el 50% para las categorías 2, 3 y 4. El alto coeficiente de variación para la categoría 3 se debe a que la operación de estos vehículos no es constante y depende del lugar donde esté destinado cada vehículo.

Para este trabajo de título es sobre todo relevante el nivel de actividad de la categoría 4, Furgones pequeños, dado que estos son el foco del proyecto de reemplazo por vehículos eléctricos. El nivel de actividad proyectado indica que los furgones pequeños tendrían un nivel de actividad diario  $82,83 \pm 44,77$  [km/día], lo que en un caso de uso intenso llegaría a 127,60 [km/día] o por el contrario en un día de poco trabajo recorrer solo 38,06 [km/día]. Se sabe además que existe días en que los vehículos no tienen actividad y otros días que su actividad es intensa, por lo que el nivel de actividad diario real podría ser mayor dado que los días de inactividad reducen el promedio. Aun así, el nivel de actividad es completamente abordable por un vehículo eléctrico en específico el Citroën E-Berlingo presentado como vehículo eléctrico de reemplazo de la flota convencional, dado que ofrece una autonomía de 170 [km] con una carga completa.

#### 4.3.2 Análisis estadístico sobre los datos registrados durante la campaña de medición

Es importante mencionar que los datos obtenidos de las VAM presentan periodos de registro sin información o con información incoherente. Esto se da en varios casos. Primeramente, cada vez que se enciende la VAM cuando se registra el movimiento del vehículo, esta se demora comenzar a registrar datos válidos y además demora algunos segundos conectarse con una cantidad de satélites que permita obtener mediciones precisas. Se quitó las entradas sin registro sin información o con información incoherente. Luego de este filtro las planillas de datos tienen la información de todo el tiempo que el vehículo estuvo en movimiento, es decir velocidad distinta de 0 [km/h].

En la Tabla 7 se presenta la media y la desviación estándar de la velocidad y la altitud de los vehículos en los momentos que estos estuvieron en movimiento. Estos son los datos que posteriormente permiten estimar la potencia generada por el vehículo y posteriormente el consumo de energía. Estos valores no son comparables de forma directa para cada uno de los vehículos ya que como se mencionó anteriormente cada vehículo fue medido en una operación distinta. Es importante mencionar que la velocidad registrada considera muchos registros con velocidades muy bajas y no hay una forma simple y certera de filtrar los

datos que representar ruido. Por lo tanto, de forma general se asume que los registros de velocidad menor a 0,05 [km/h] representan que el vehículo se encuentra detenido a pesar de que la VAM registra actividad.

Tabla 7. Revisión estadística de los datos registrados.

| Vehículo<br>(Placa patente)      | Tiempo de<br>medición<br>válido<br>(hh:mm) | Nº de<br>registros<br>válidos | Velocidad<br>[km/h] | Altitud<br>[m.s.n.m.] |
|----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>BEVA</b><br><b>(HWPF-36)</b>  | 23:03                                      | 83.036                        | 15,97 ± 25,40       | 516,23 ± 25,08        |
| <b>ICVA</b><br><b>(HBHD-32)</b>  | 7:43                                       | 27.830                        | 18,35 ± 26,44       | 508,61 ± 16,10        |
| <b>BEV1</b><br><b>(HWPF-36)</b>  | 06:43                                      | 24.224                        | 15,33 ± 22,89       | 511,59 ± 26,08        |
| <b>ICV 1</b><br><b>(HVPX-72)</b> | Falla de registro                          |                               |                     |                       |
| <b>BEV2</b><br><b>(HWPF-35)</b>  | 04:07                                      | 14.871                        | 13,69 ± 19,74       | 727,70 ± 43,23        |
| <b>ICV 2</b><br><b>(HBHD-96)</b> | 02:16                                      | 8.190                         | 20,96 ± 26,02       | 568,34 ± 37,94        |

Se puede ver entonces que tiempo de uso de los vehículos estudiados es bajo, por ejemplo, comparado con la utilización de los vehículos del transporte público, como taxis o buses. Desde esta perspectiva es importante mencionar que la generación de valor de la flota se da en la medida que se cumple el traslado del equipo técnico a los lugares que son requeridos y en ese sentido un vehículo de la flota operacional de Aguas Andinas genera valor como complemento a las funciones realizadas por el equipo de personas que requieren el traslado. Se vuelve importante que el vehículo cumpla de forma infalible con esa misión. Por esto se da que maximizar la utilización tiene una cota máxima establecida por la necesidad de traslado de la empresa. Los vehículos no tuvieron fallas de operación que impidieran el trabajo del equipo técnico.

#### 4.3.3 Análisis de los recorridos

Se usó GPS Visualizer (<http://www.gpsvisualizer.com/>), una herramienta web gratuita, para crear archivos KML y ver el recorrido de los vehículos sobre el mapa. En la Figura 17 se muestra BEVA en rojo y ICVA en amarillo. BEVA tuvo movimiento durante los días entre el martes de 14/11/2016 hasta el 23/11/2016 con excepción del domingo 19 mientras que se registró movimiento de ICVA entre los días 14/11/2016 y 16/11/2017. Como era de esperar el movimiento de los 2 vehículos se concentró en la zona centro y norte de Santiago. En la Figura 18. Recorridos de los cuatro vehículos estudiados durante la campaña de medición año 2017. (BEV1 en celeste, BEV2 en verde y ICV2 en azul) se ve el recorrido de los 4 vehículos de la campaña de medición de 2017. En celeste se muestra BEV1, en verde BEV2 y en azul ICV2. Puede verse el recorrido de todos los vehículos por separado en el Anexo 2.

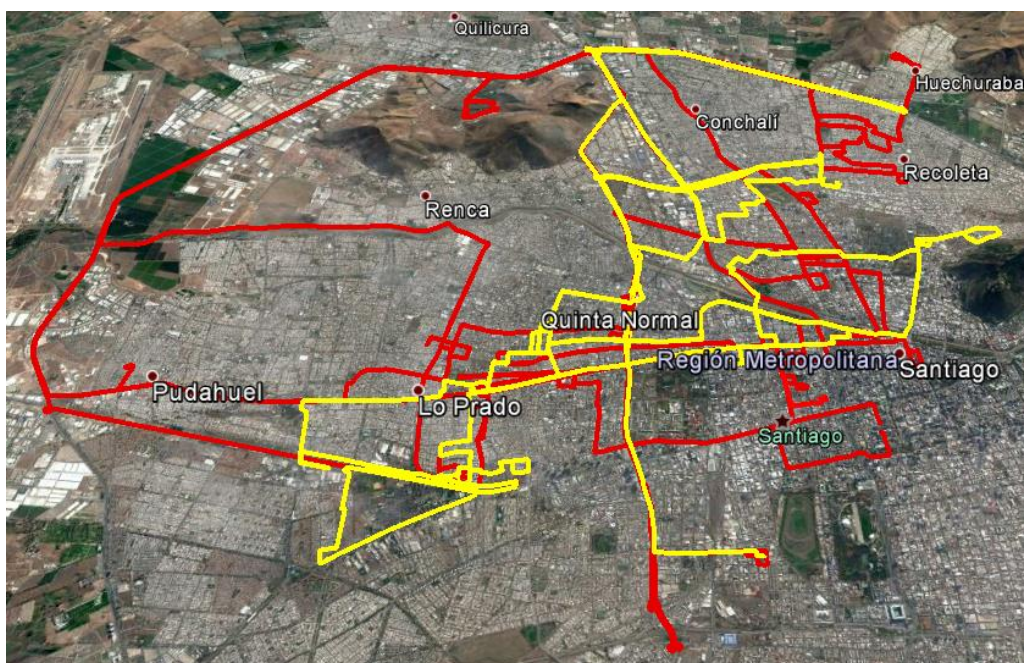


Figura 17. Recorridos de los dos vehículos estudiados durante la campaña de medición año 2016. BEVA en rojo y ICVA en amarillo.

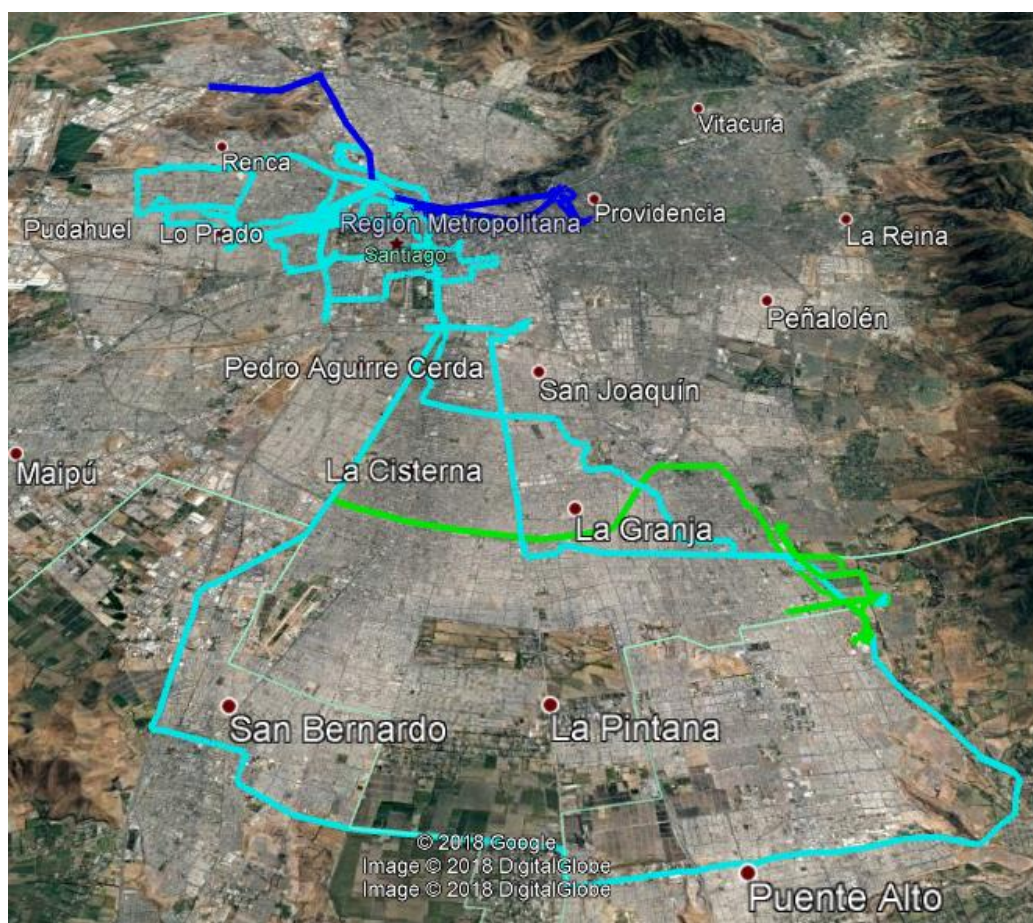


Figura 18. Recorridos de los cuatro vehículos estudiados durante la campaña de medición año 2017. (BEV1 en celeste, BEV2 en verde y ICV2 en azul)

La altitud presentada en la subsección 4.3.2 para cada vehículo se condice con la altitud de los lugares mostrados en el mapa. El centro operacional Lo Prado tiene una altitud de 508 [m.s.n.m.] mientras que el edificio Corporativo tiene una altitud de 562 [m.s.n.m.]. Esto valida el uso de los datos para utilizar modelo teórico de potencia específica vehicular (VSP).

En los mapas se puede ver el uso de diferentes rutas dentro de la ciudad. Se puede ver de forma clara el uso de la autopista Vespucio Norte y Autopista Central para la campaña de 2016 y para la campaña 2017 se suma pasadas por la autopista Vespucio Sur y Costanera Norte. Además, se registra el uso de avenidas grandes como la Av. Libertador General Bernardo O'Higgins, Av. Providencia, Av. Andrés Bello, Av. Departamental. También se registra recorrido por calles pequeñas. Dado el tamaño de las rutas usadas se puede esperar que el movimiento de los vehículos registre un amplio rango de velocidades, para autopistas debería registrarse velocidades superiores a 60 [km/h] y para rutas en avenidas grandes la velocidad debería ser menor que en las autopistas y mayor que la velocidad de circulación en calles pequeñas.

#### 4.3.4 Análisis energético

En esta subsección se analiza los parámetros característicos de la operación de los vehículos estudiados es decir la velocidad, la altitud, la potencia específica vehicular y finalmente el consumo de energía. Para este análisis se construyó las gráficas para todos los vehículos, pero se presentan como ejemplo en esta subsección las gráficas para el vehículo BEVA, ya que fue el vehículo que registró mayor tiempo en movimiento.

##### *Velocidad*

Como se muestra en la Tabla 7 la velocidad registrada tiene una media que no supera los 21 [km/h] y la desviación estándar muestra una alta variabilidad en la velocidad a lo largo del tiempo de medición para todos los vehículos. El entendimiento de la velocidad por la interpretación de la media y la desviación estándar no es preciso y puede ocultar el comportamiento real del vehículo. Para obtener una mirada más en detalle es valioso observar el perfil de velocidad construido por la velocidad en función del tiempo. Puede verse el perfil de velocidad de todos los vehículos para todos los días registrados en el Anexo 2. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 19 el perfil de velocidad de los vehículos BEVA y ICVA del día 17/11/2016 y en la Figura 20 el perfil para los vehículos BEV2 y ICV2 el día 10/10/2017.

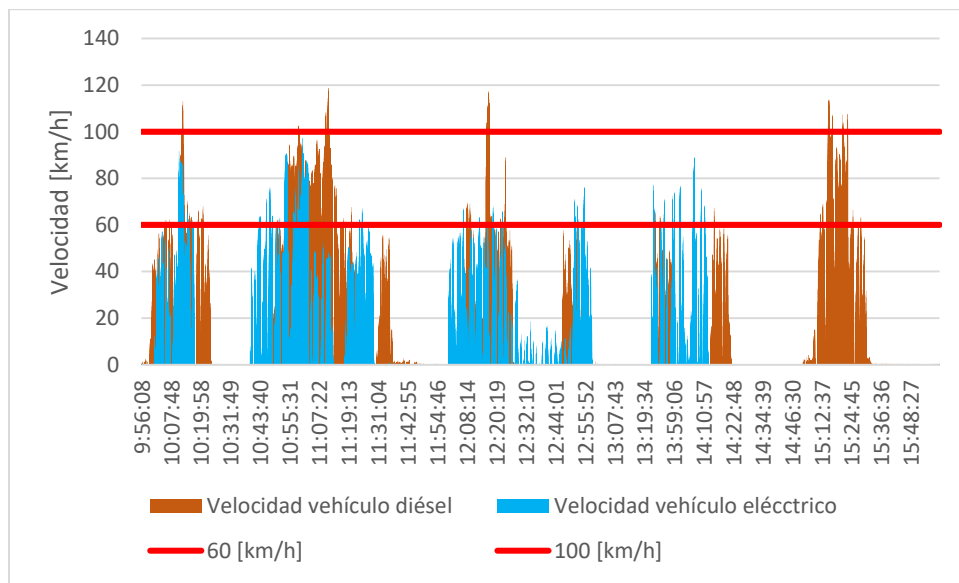


Figura 19. Perfil de velocidad de BEVA y ICVA el día 17/11/2016.

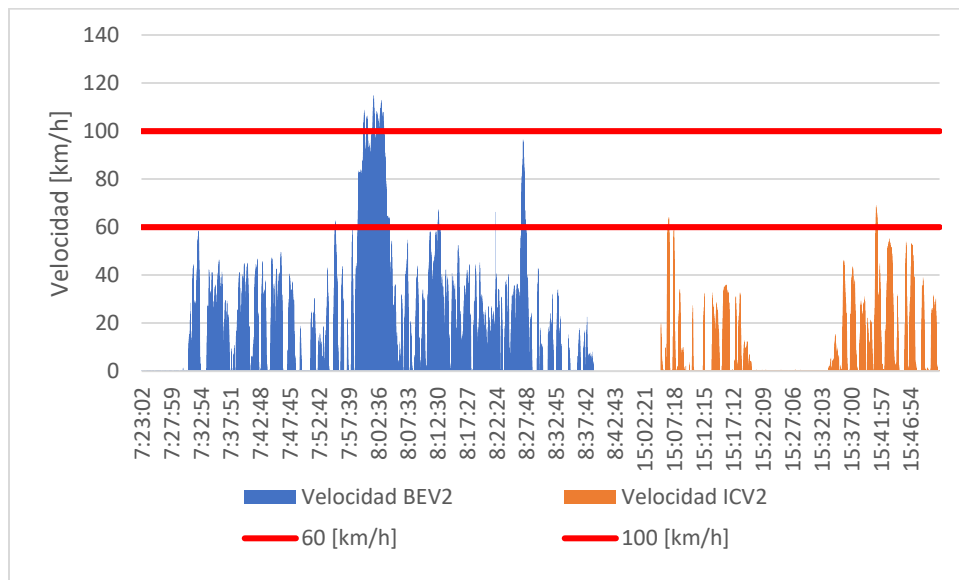


Figura 20. Perfil de velocidad de BEV2 y ICV2 el día 10/10/2017.

De cada perfil de velocidad es posible ver los momentos en que un vehículo estuvo en movimiento. En la Figura 19 y la Figura 20, existen cúmulos de datos de velocidad distinta de cero que representan un periodo de movimiento y que están separados por periodos de tiempo con velocidad nula o muy cercana a cero. Se define como un movimiento a un cúmulo de datos consecutivos donde la velocidad es distinta de cero, sin embargo, para diferenciar las paradas típicas de una conducción urbana con una detención prolongada se considera que el tiempo detenido debe ser mayor a 5 minutos. Por ejemplo, para BEVA se ven 4 movimientos durante el día mientras que ICVA se ven 6 movimientos (Figura 19), BEV2 se movió solo una vez el día mostrado y ICV2 tuvo 2 movimientos (Figura 20).

Como se mencionó anteriormente la velocidad de circulación depende del tipo de ruta y se puede ver como existe momentos en que la velocidad supera los 60 [km/h] cuando el vehículo recorre en alguna de las autopistas de la capital. Las velocidades menores a 60 [km/h] representan un movimiento dentro del entorno urbano, considerando la conducción entre avenidas, calles pequeñas.

## Aceleración

Es necesario utilizar la aceleración en la línea de trayectoria del vehículo. La unidad VAM registra aceleración en 3 coordenadas según un propio eje de referencia. Esta aceleración no puede usarse para estimar la aceleración en la dirección del movimiento ya que la VAM no fue ubicada con la misma referencia que el vehículo. La aceleración fue calculada como la diferencia entre dos datos consecutivos de velocidad en metros por segundo (m/s). Dado que la diferencia entre cada dato corresponde a 1 [s] la aceleración está expresada metros por segundo al cuadrado ( $\text{m/s}^2$ ).

Para ver de forma gráfica la aceleración se construyó un gráfico de dispersión de velocidad y aceleración. En estos se ve una acumulación o nube de puntos a bajas velocidades y a bajas aceleraciones. Cabe mencionar que en los gráficos se ven puntos con alta aceleración que corresponden a discontinuidades en el registro de los datos, por lo tanto, existe algunos puntos de la nube que no son reales.

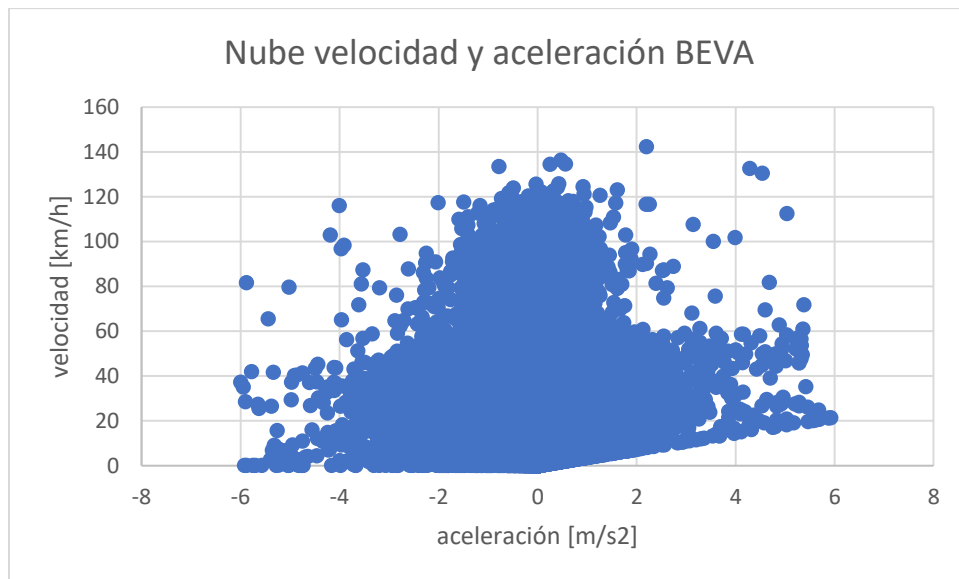


Figura 21. Nube de velocidad y aceleración para el vehículo BEVA.

Existe una mayoría significativa de datos rondan la zona de velocidad menor a 10 [km/h] y una zona de aceleración entre -2 y 2 [ $\text{m/s}^2$ ]. Esto puede verse más claramente en la Figura 22 donde se muestra la frecuencia en que ocurren las combinaciones velocidad aceleración para el vehículo BEVA.

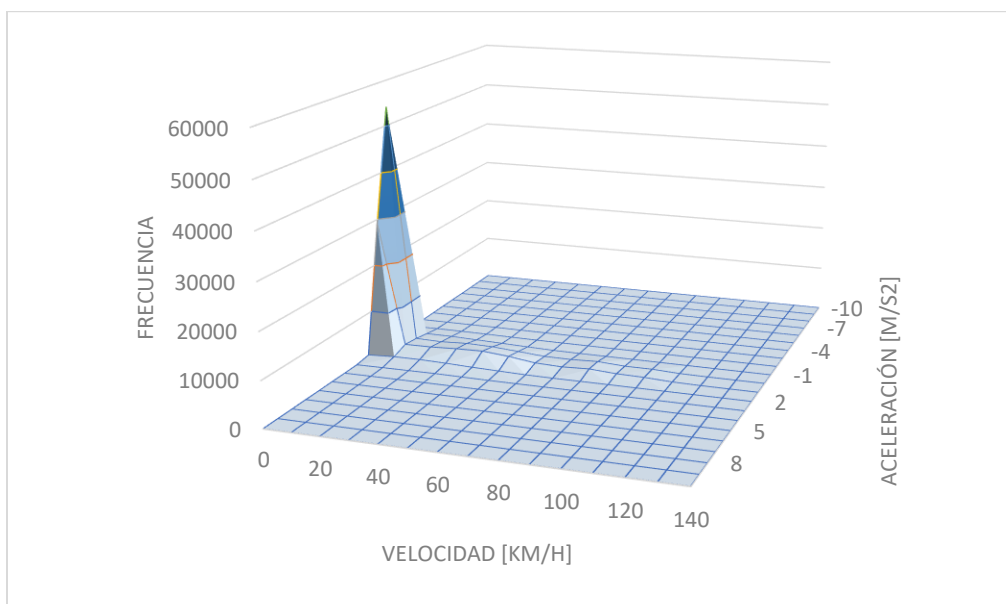


Figura 22. Frecuencia bivariado velocidad y aceleración para los 4 vehículos medidos.

En la Figura 22 se puede ver que la combinación entre velocidad y aceleración que aparece con más frecuencia para el vehículo BEVA. Se tiene que el 43% de los registros tiene velocidad menor de 0,1 [km/h] donde se asume que el vehículo estuvo en una detención muy corta, funcionando en ralentí o apenas comenzando un movimiento. La proporción sube a 67% contando las velocidades menores a 1 [km/h]. Fijándose en la aceleración se tiene un 21% de registros con aceleración igual a 0 [m/s<sup>2</sup>]. Mientras que 37% ocupan la zona entre 0 y 1 [m/s<sup>2</sup>] y 34% ocupan la zona entre -1 y 0 [m/s<sup>2</sup>]. Esta diferencia indica que el vehículo pasó mayor tiempo acelerando, y menos tiempo frenando, es decir una diferencia de 3%. Se entiende entonces que la mayor cantidad del tiempo registrado los vehículos se encontraban a baja velocidad y baja aceleración. De forma complementaria, los momentos de alta velocidad o alta aceleración son significativamente menores. La situación descrita para el vehículo BEVA se repite para todos los vehículos.

### Altitud

Fue considerada la altitud entregada por el GPS de la unidad VAM por sobre las mediciones de altitud generadas por barómetro. En la Figura 23 se presenta la gráfica de altitud en función del horario durante todos los días de la medición. Estos datos resultan coherentes con la altitud media de la ciudad de Santiago que es de 570 [m.s.n.m.] y con la altitud del centro operacional Lo Prado que es 508 [m.s.n.m.]. Todos los vehículos presentan un recorrido entre los 450 y 700 [m.s.n.m].

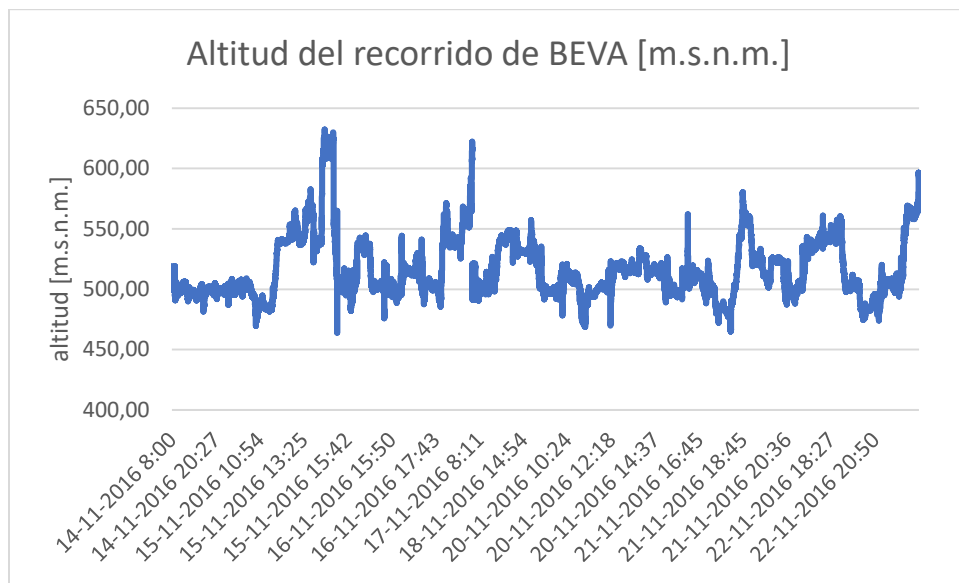


Figura 23. Altitud del recorrido del vehículo BEVA para todos los días de medición.

Cabe destacar que la altitud del recorrido se relaciona con la energía potencial, por lo tanto, el vehículo debe generar potencia para trasladarse a un punto de mayor altitud, pero también tendrá energía disponible para su movimiento si es que transita en un recorrido con pendiente negativa. Esta variable influye en la potencia específica vehículo explícitamente en los términos que son función del ángulo de elevación.

#### ***Potencia específica vehicular (VSP) y energía utilizada***

Finalmente se construye la variable potencia específica vehicular con los datos de velocidad y altitud. Esta magnitud es calculada con la Ecuación 4. Potencia específica vehicular según modelo IVE. que permite estimar la VSP a partir de la velocidad, la aceleración y la pendiente. La potencia específica vehicular permite ver los momentos en que el vehículo requiere energía para moverse (VSP positivo) o debe disipar energía para reducir la energía (VSP negativo) ya sea recuperando con los frenos regenerativos, o disipando calor por los frenos convencionales. En la Figura 24 se presenta como ejemplo el perfil de la potencia específica vehicular del vehículo BEVA en todo el periodo de tiempo registrado. Existe puntos con VSP mayores a 100 [W/kg] y menores de -100 [W/kg] los que generalmente representan discontinuidades en el registro y por lo tanto se simulan como una variación brusca de velocidad o altitud. Los valores extremos de VSP son compensados con la potencia desarrollada por el vehículo y no registrada en dichas discontinuidades.

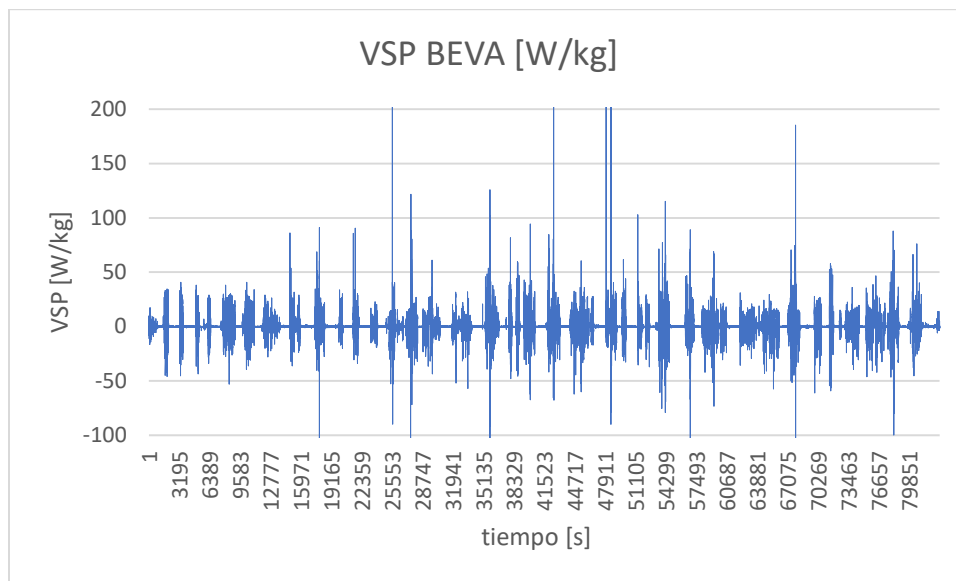


Figura 24. Potencia específica vehicular del vehículo BEVA.

La potencia específica vehicular permite estimar la energía usada en el movimiento del vehículo simplemente multiplicando por el tiempo de operación, en otras palabras, integrando la curva del perfil de VSP por el tiempo como se indica en la Ecuación 5. Este proceso fue realizado para todos los vehículos a fin de obtener un valor de energía usada. En el caso de las mediciones para vehículos eléctricos se compara la energía usada con la energía eléctrica suministrada al vehículo para estimar una eficiencia energética empírica.

Tabla 8. Consumo de energía de los vehículos, eficiencia calculada y rendimiento real de los vehículos eléctricos.

| Vehículo<br>(Placa patente) | Energía<br>usada<br>[kWh] | Energía<br>suministrada<br>[kWh] | Eficiencia<br>calculada [-] | Recorrido total<br>[km] | Rendimiento<br>real<br>[kWh/km] |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| <b>BEVA<br/>(HWPF-36)</b>   | 37,53                     | 79,9                             | 46,97%                      | 368,33                  | 0,22                            |
| <b>ICVA<br/>(HBHD-32)</b>   | 15,24                     | No aplica                        | No aplica                   | 141,85                  | No aplica                       |
| <b>BEV1<br/>(HWPF-36)</b>   | 10,16                     | 27,40                            | 37,07%                      | 103,17                  | 0,26                            |
| <b>ICV 1<br/>(HVPX-72)</b>  | Falla de registro         |                                  |                             |                         |                                 |
| <b>BEV2<br/>(HWPF-35)</b>   | 13,53                     | 33,80                            | 40,03%                      | 56,56                   | 0,60                            |
| <b>ICV 2<br/>(HBHD-96)</b>  | 5,06                      | No aplica                        | No aplica                   | 47,67                   | No aplica                       |

Se puede ver que existe una diferencia entre BEVA y BEV1 a pesar de ser el mismo vehículo con la salvedad de ser medido en 2016 y 2017 respectivamente. Se asume que esta diferencia se basa en los modos de conducción y la naturaleza de la operación del vehículo además de un deterioro de la capacidad del vehículo dada su antigüedad.

#### 4.3.5 Análisis de emisiones contaminantes

##### *Línea base de emisiones de la “flota del grupo Aguas”.*

A continuación, se presenta la línea base de la flota Aguas. Se considera 517 vehículos, descontando maquinaria, cargadores frontales y carros de arrastre. Para los cálculos se estimó el nivel de actividad de los grupos de vehículos de la flota, a saber, el nivel de actividad de los furgones es 26.728 [km/año], de las camionetas (y vehículos ejecutivos) es 22.422 [km/año] y para los camiones es 12.599 [km/año].

Del mismo modo, se presenta las emisiones para generadas en caso de desarrollarse el escenario “Alternativa 2” (emisión reducida), considerando la integración de furgones eléctricos por año según se indica en la Tabla 9. La proyección del crecimiento de la flota de furgones eléctricos, comenzando en 10 y aumentando progresivamente hasta llegar al 50% de los furgones operativos en el año 2025. Se asume esta progresión como un escenario probable en el caso de que los precios de leasing operacionales para vehículos eléctricos sigan bajando con los años.

*Tabla 9. Proyección de entrada de furgones eléctricos 2017-2025*

| <i>Año</i> | <i>Número de<br/>furgones eléctricos</i> |
|------------|------------------------------------------|
| 2018       | 10                                       |
| 2019       | 20                                       |
| 2020       | 40                                       |
| 2021       | 60                                       |
| 2022       | 80                                       |
| 2023       | 100                                      |
| 2024       | 120                                      |
| 2025       | 140                                      |

A continuación, se presentan la línea base y emisión de la Alternativa 2 para los contaminantes CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP (material particulado) y huella del agua. Esta estimación de línea base y reducción de la emisión de CO<sub>2</sub> y contaminantes locales se realizó utilizando la herramienta para monitoreo y reporte de la NAMA Zona Verde, desarrollada por Sistemas Sustentables S.L. Esta herramienta permite calcular la línea base y potencial de reducción de un proyecto, caracterizando la flota de estudio por tipos de vehículos y normas de emisión y asignando el número de vehículos eléctricos considerados.

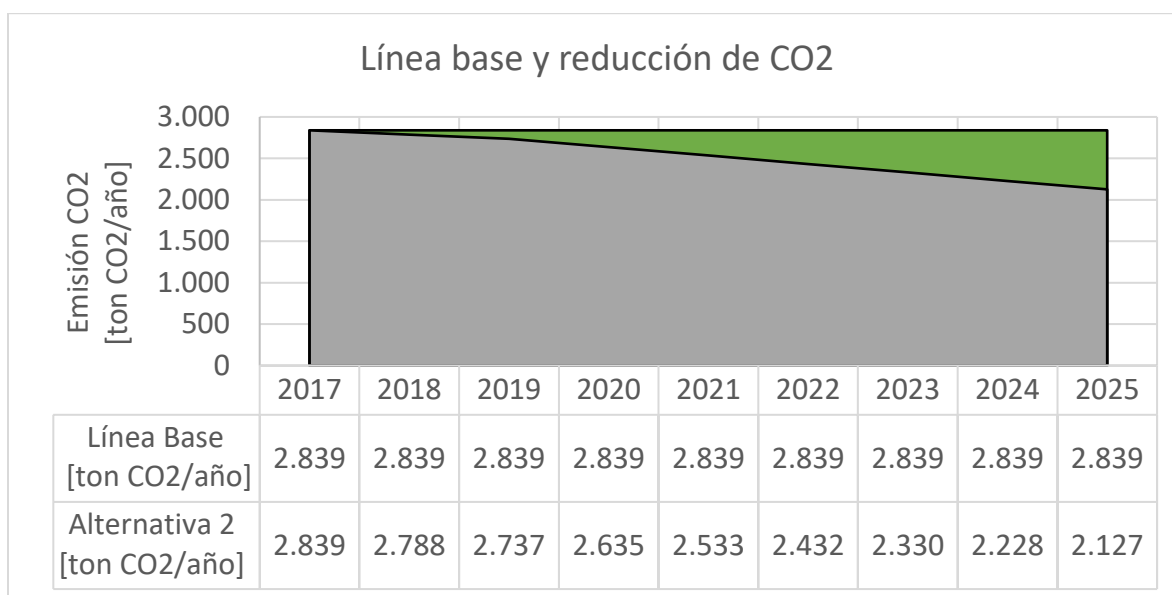


Figura 25. Línea base y emisión de la Alternativa 2 para CO<sub>2</sub> de la flota de Aguas.

Si no se incluyen vehículos eléctricos, la emisión de CO<sub>2</sub> es 2.839 [ton CO<sub>2</sub>/año], constante a lo largo de los años, como se muestra para la línea base. Cabe mencionar en este punto que la línea base calculada en la evaluación versión 1 del año 2016 fue de 2.996 [ton CO<sub>2</sub>/año] y se asume que esta diferencia radica en una mejor estimación del nivel de actividad de la flota. La diferencia representa un 6% sobre el cálculo del año 2017. La emisión de CO<sub>2</sub> no se reduce con la mejora en los filtros de los contaminantes locales por lo tanto a pesar de una estimación de la renovación de la flota esta emisión permanece constante. Bajo esta situación la única alternativa de reducir la emisión de CO<sub>2</sub> es dejar reducir el consumo de combustible. La reducción es lineal ya que responde directamente al reemplazo de vehículos convencionales por otros eléctricos. Con el recambio de 49% de los furgones al año 2025 se lograría una reducción del 25% de la emisión de CO<sub>2</sub>. Se puede decir que si fueran reemplazados la totalidad de los furgones se lograría una reducción aproximada de 50% de la línea base. Si bien esta es una meta ambiciosa, una vez lograda el paso siguiente sería abordar el otro 50% de emisión generados por vehículos que no son furgones. Haciendo referencia al total de la emisión, con el proyecto de reemplazo en las condiciones propuestas logra una reducción de 2.899 [ton CO<sub>2</sub>] lo que equivale a un 11% de la emisión acumulada de la línea base.

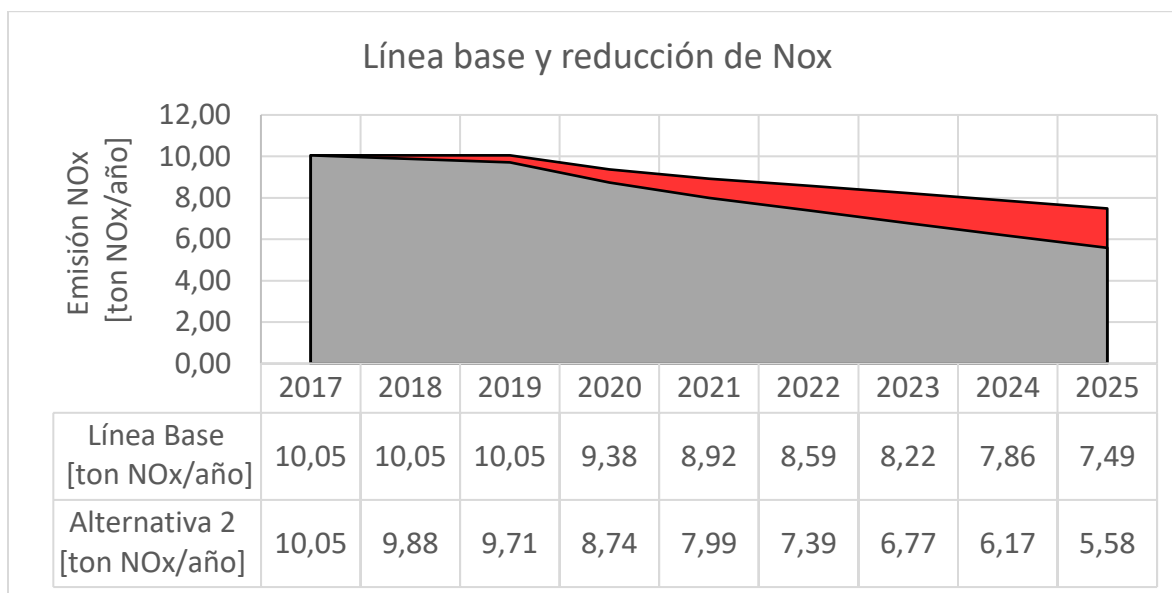


Figura 26. Línea base y emisión de la Alternativa 2 para NOx de la flota de Aguas.

De la Figura 26 se ve como la línea base de NOx disminuye en el tiempo ya que el recambio de vehículos por otros con mejor estándar de emisiones (Euro V y VII) sobre todo en el grupo de los camiones. Estos son los principales responsables de las emisiones de gases contaminantes locales ya que también son los vehículos operativos más viejos y algunos fueron fabricados bajo estándares más permisivos de control de emisiones. Por otro lado, la reducción de las emisiones de NOx es lineal ya que al igual que para el CO<sub>2</sub> la emisión es directamente proporcional con la cantidad de vehículos reemplazados.

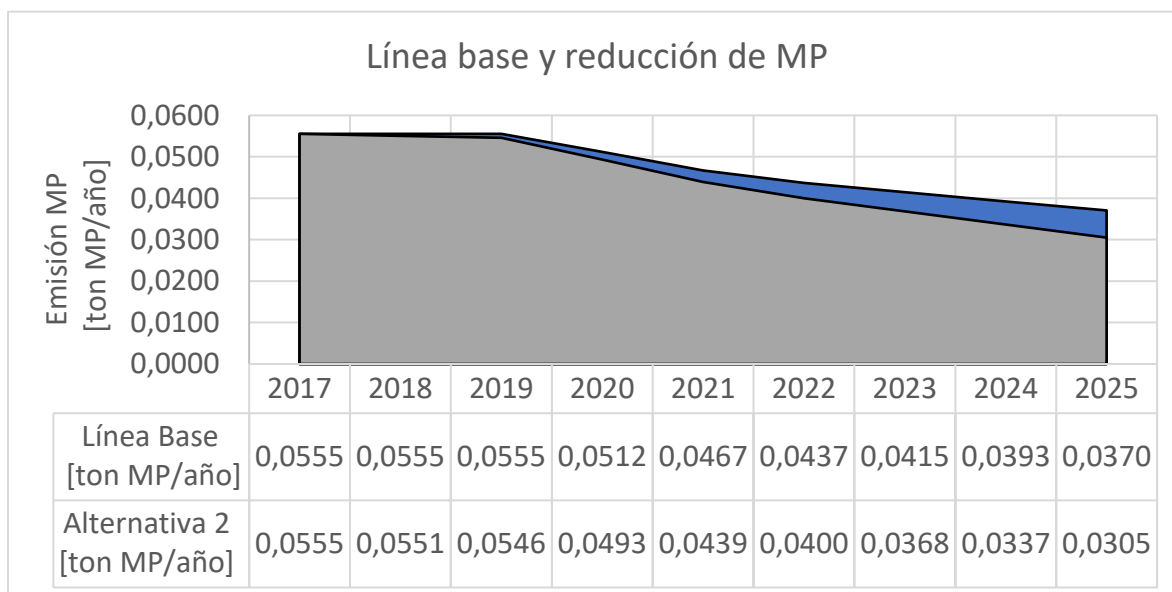


Figura 27. Línea base y emisión de la Alternativa 2 para MP de la flota de Aguas.

Al igual que para NOx la reducción del material particulado (MP) se da en primera instancia por la renovación de los vehículos de la flota asociado a una mejora en la norma de emisión. En segundo lugar, por el recambio a tecnología eléctrica. Esto puede verse en la Figura 27.

Finalmente se presenta la línea base y reducción esperada de la huella de agua de la flota. Esta estimación de huella del agua se basa en la reducción del consumo de combustible. Se sabe que por cada litro de combustible diésel se ocupan 12,9 litros de agua. A modo de ejemplo, la línea base representa una cantidad de 999.519 [lt diésel<sub>eq</sub>/año] lo que corresponde a 12,89 [millones lt agua].

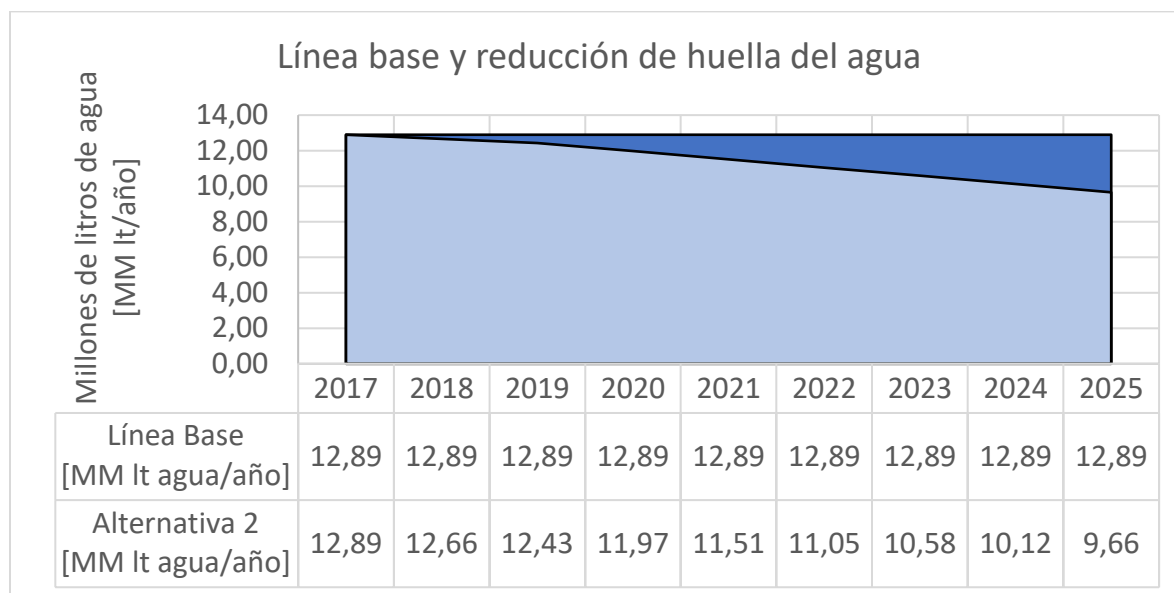


*Figura 28. Línea base y reducción de la Alternativa 2 de la huella de agua de la flota de Aguas.*

Es evidente que la huella del agua se presenta de la misma forma que la reducción de CO<sub>2</sub> y las proporciones de reducción son las mismas. Por lo mismo, la reducción en la huella del agua al año 2025 corresponde al 25%. Por otro lado, la huella de agua reducida desde 2017 a 2025 es de 13,17 [millones lt agua] lo que corresponde al 11% del agua usada para el combustible de la operación de la flota.

Concluyendo se puede decir que las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP (material particulado) y huella del agua producto de ejecutar el proyecto de reemplazo de vehículos convencionales por vehículos eléctricos (comenzando por la Alternativa 2 de leasing operativo para el año 2018) presentan una reducción de las emisiones del 11% para CO<sub>2</sub> y la huella del agua, mientras que para NO<sub>x</sub> y MP a reducción es de 10% y 6% respectivamente, todo para el periodo entre 2017 y 2025. Si bien este es un esfuerzo importante se deberá evaluar en el futuro el escenario de entrada de vehículos eléctricos y si la reducción realizada se ajusta a los objetivos de la empresa.

#### ***Potencial de reducción de emisiones de gases contaminantes y huella del agua***

Se presenta a continuación el potencial de reducción de emisiones y de la huella del agua en 3 escenarios. El primero contempla el reemplazo de 10 furgones como el caso más probable para 2018, el segundo caso contempla el reemplazo de 140 furgones, o sea, 49% de los furgones y el último contempla el reemplazo de 287 furgones, es decir la totalidad de los furgones. Se presenta en la Tabla 10 la reducción anual dependiendo de la cantidad de vehículos eléctricos reemplazados. Entre paréntesis se indica el porcentaje sobre las emisiones de la línea base.

Tabla 10. Potencial de reducción de emisiones y huella del agua. Además, la variación sobre la línea base.

| <b>Escenario</b> | <b>N° furgones a reemplazar</b> | <b>Potencial de reducción anual CO2 [tonCO2/año]</b> | <b>Potencial de reducción anual MP10 [tonMP/año]</b> | <b>Potencial de reducción anual NOx [tonNOx/año]</b> | <b>Potencial de reducción anual Huella del agua [litros/año]</b> |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1                | 10                              | 50 (2%)                                              | 0,0005 (1%)                                          | 0,17 (2%)                                            | 231.001 (2%)                                                     |
| 2                | 140                             | 711 (25%)                                            | 0,0065 (12%)                                         | 2,36 (23%)                                           | 3.234.023 (25%)                                                  |
| 3                | 287                             | 1.459 (51%)                                          | 0,0134 (24%)                                         | 4,84 (48%)                                           | 6.629.747 (51%)                                                  |

De la Tabla 10 se ve que la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y la reducción de la huella del agua cambian aproximadamente en la misma proporción de los vehículos reemplazados, es decir la reducción es directa a la cantidad de vehículos y en el caso analizado que supone el reemplazo de los furgones el potencial corresponde a la reducción de todas las emisiones generadas por los furgones que a su vez representan aproximadamente el 50% de las emisiones de la flota de Aguas. En el caso del material particulado (MP), la reducción no es directa ya que los furgones no son los principales responsables, sino que son los camiones, los que dada su antigüedad producen gran parte del material particulado (entre 60% y 40%).

Para poder entender la magnitud del potencial de reducción se presenta equivalencias en plantaciones de árboles, específicamente en plantación de eucalipto y pino insignie o roble. El eucalipto es una de las especies que tiene mayor absorción de CO<sub>2</sub> y el pino insignie es otra especie plantada usualmente para faena forestal, mientras que el roble representa al bosque nativo. Para aumentar la comprensión de la magnitud se presenta la equivalencia en número de canchas de futbol plantadas.

Tabla 11. Equivalencia canchas de futbol plantadas del potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

| <b>Escenario</b> | <b>N° de furgones eléctricos</b> | <b>Potencial de reducción [ton CO2/año]</b> | <b>Canchas de futbol Eucalipto</b> | <b>Canchas de futbol Pino Insignie</b> | <b>Canchas de futbol Roble</b> |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|
| Línea Base       | -                                | 2.839                                       | 102,5                              | 188,1                                  | 187,9                          |
| 1                | 10                               | 51                                          | 1,8                                | 3,4                                    | 3,4                            |
| 2                | 140                              | 712                                         | 25,7                               | 47,2                                   | 47,1                           |
| 3                | 287                              | 1.460                                       | 52,7                               | 96,7                                   | 96,6                           |

Las equivalencias se realizan considerando que una reducción de emisiones es igual a la absorción de un grupo de árboles. Por lo tanto, para lograr una emisión neta igual a cero la empresa podría invertir en plantar 102,5 [canchas de futbol] de eucalipto o 188,1 [canchas de futbol] de pino insignie o 187,9 [canchas de futbol] de robles, para con esto compensar la emisión de gases de efecto invernadero. Es claro que el proyecto de reemplazo de la flota logra este impacto con un menor uso de recursos y espacio.

#### 4.3.6 Análisis económico

A continuación, se presenta el análisis comparativo de un furgón ICV y un furgón BEV. Específicamente se compara el costo de operación anual entre un (1) ICV de la flota operacional, tradicionalmente representado por un Peugeot Partner HDI 1.6, y un (1) BEV, Citroën Berlingo, candidato estudiado para el reemplazo. También se analiza el costo del proyecto de reemplazo 2018, considerando la integración de 10 furgones eléctricos. Estos análisis esperan ser insumo técnico para la toma de decisión referente al reemplazo de vehículos eléctricos. Para la evaluación el costo de leasing operativo ocupado para los BEV es de 20 [UF/mes/vehículo]. Se espera que este costo pueda bajar luego de la publicación de la licitación para vehículos operacionales.

El costo de operación o costo operacional de un vehículo de una flota cualquiera se compone por el pago de la cuota de inversión del vehículo, el costo de energía, el costo de mantenimiento y el costo de mano de obra para la operación. Teniendo en consideración que la flota de Aguas funciona con leasing operacional, no existe una inversión inicial para vehículos. Por esta razón la evaluación económica del proyecto de reemplazo de la flota se realiza analizando el costo de operación de los vehículos. En este caso, tanto la inversión del vehículo como el costo de mantenimiento está incluido en el costo de leasing operacional. No se considera para esta evaluación el costo de mano de obra no se modifica con este proyecto ya que ni las labores ni el tiempo de trabajo del personal se modifican directamente por el recambio de vehículos. Cabe mencionar que el costo de energía es menor para vehículos eléctricos que para vehículos de combustión interna, pero, por otro lado, el costo de inversión (capital) de un vehículo eléctrico es mayor que el de los vehículos de combustión interna lo que se refleja en la diferencia del costo de leasing operacional entre un CIV y un BEV. El costo de leasing transfiere a la operación el costo de inversión, de financiamiento y de mantenimiento que es asumido por el proveedor. Con estas consideraciones se estima el costo operacional como la suma del costo de energía y el costo de leasing en un periodo de tiempo. Se estudia 3 escenarios para el nivel de actividad anual (kilómetros recorridos al año) considerando 365 [días] de trabajo al año.

Dado que el servicio que entrega estos vehículos no genera ingresos directamente al giro de la empresa el beneficio económico se evaluará como una reducción del costo de operar un vehículo. En el cálculo de costo operacional no se considera el costo de mano de obra ni el costo de mantenimiento. No se modifica ni las labores ni el tiempo de trabajo por lo que no se realizan cambios en las remuneraciones del personal. El mantenimiento es incluido en el costo de leasing. En este estudio no se genera un análisis en profundidad sobre estas variables ya que el proyecto no las modifica, pero sin duda estas variables son muy importantes para estudiar una flota en otros niveles, por ejemplo, para el área de recursos humanos o para el área de mantenimiento de la empresa de leasing.

Para esta evaluación económica el costo **operacional** considera el costo de leasing y el costo de energía. El costo del leasing de un Citroën E-Berlingo es mayor que el de un Peugeot Partner. La composición de este costo es parte del secreto comercial de la empresa de leasing, pero se sabe que tiene relación principalmente con el costo de adquisición, el costo de mantenimiento y el valor residual de los vehículos. Si bien el costo de mantenimiento de un BEV es menor que el de un ICV esto no compensa la diferencia en precio del vehículo. Por otro lado, el costo de energía es menor para un BEV ya que el costo de la electricidad es menor que del combustible y además tienen mayor eficiencia. A continuación, se presenta la fórmula para calcular el costo operacional.

$$\text{Costo operacional} = \text{Leasing} + \text{Energía}$$

Ecuación 7. Costo operacional

El costo de **leasing** se negocia con la empresa que presta este servicio. Se estima que el costo de leasing operacional para el Citroën E-Berlingo será de 20 [UF/mes], muy por debajo de los 23,61 [UF/mes] que se alcanzó en las negociaciones el 2016 para furgones Renault Kangoo Z.E. El costo del leasing anual se calcula como el costo mensual por 12 meses, a continuación, se muestra la Ecuación 8 para este cálculo y posteriormente se muestra los parámetros que influyen en el costo de leasing en la Tabla 12.

$$\text{Leasing}_{\text{año } i} = \text{Leasing}_{\text{mensual}} * 12$$

Ecuación 8. Costo de leasing anual

Tabla 12. Parámetros de costo de leasing operacional.

| Parámetros                                        | unidad   | monto |
|---------------------------------------------------|----------|-------|
| Tarifa de leasing Renault Kangoo Z.E. 2017        | [UF/mes] | 23.61 |
| Tarifa de leasing Citroën E-Berlingo (estimación) | [UF/mes] | 20    |
| Tarifa de leasing Peugeot Partner HDI 2016 y 2017 | [UF/mes] | 9,8   |

El costo de **energía** consumida es relativo al nivel de actividad, es decir depende del uso y del rendimiento energético de los vehículos, y del precio del combustible, sea diésel o electricidad. Los costos son calculados con las siguientes fórmulas. Posteriormente se muestran los parámetros que influyen en el costo de energía en la Tabla 13.

$$\text{Energía}_{\text{año } i} = \text{NA}_{\text{año } i} * \text{consumo}_{\text{energía}} * \text{precio}_{\text{energía}}$$

Ecuación 9. Costo de energía anual

Tabla 13. Parámetros de costo de energía.

| Parámetro                                                  | unidad   | monto   |
|------------------------------------------------------------|----------|---------|
| Nivel de actividad anual promedio de furgones              | [km/año] | 31.706  |
| Consumo energía eléctrica por kilómetro Citroën E-Berlingo | [kWh/km] | 0,150   |
| Precio electricidad centro operacional promedio            | [UF/kWh] | 0,00266 |
| Consumo diésel por kilómetro Peugeot Partner HDI           | [lt/km]  | 0,100   |
| Precio diésel                                              | [UF/lt]  | 0,0181  |

#### Comparación de un furgón ICV y un furgón BEV.

Se comparará el gasto operacional de un furgón convencional diésel (ICV) con un furgón eléctrico (BEV) considerando 3 escenarios de nivel de actividad, pesimista, realista y optimista. En el escenario optimista se calcula en base a 150 [km/día], mientras que en el escenario realista se calcula con un uso diario de 110 [km/día] y por último en el escenario pesimista se calcula con un uso de 75 [km/día]. En la Figura 29, se muestra el costo de operación formado por el costo de energía y costo de leasing.

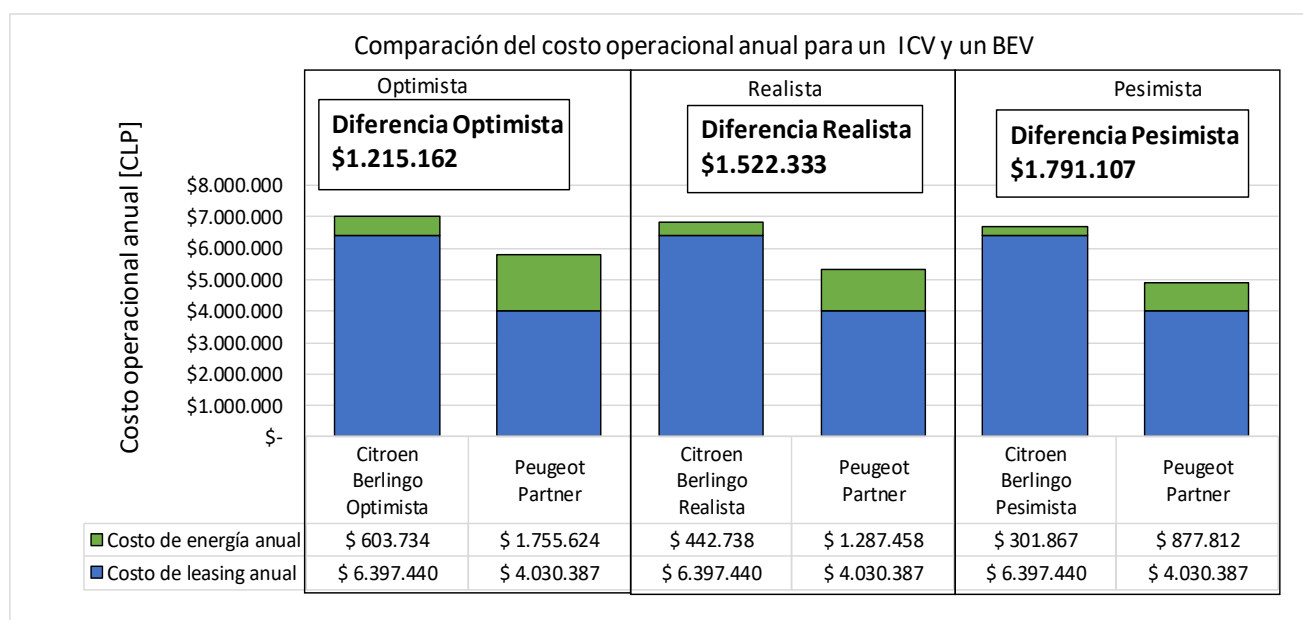


Figura 29. Comparación del costo operacional anual para un ICV y un BEV. Costo de operación anual desagregado en costo de energía y costo de leasing, para escenario realista, optimista y pesimista.

El costo de un BEV es mayor que un ICV para los 3 escenarios. Mientras que en el escenario optimista la diferencia es entre los vehículos es de \$1.215.162, en el escenario realista la diferencia es \$1.522.333 y en el escenario pesimista la diferencia alcanza \$1.791.107, lo que se muestra de forma gráfica en la Figura 30. De las gráficas, se puede ver que a medida que la utilización de los vehículos aumenta, el costo de operación del BEV se acerca al costo del ICV. Esto se da porque el costo de la energía es mucho menor para el vehículo eléctrico, por esto se recomienda dar la mayor utilización posible a los vehículos eléctricos y de esta forma aprovechar al máximo el beneficio de su bajo costo de energía. El costo de leasing operacional se fija por contrato por esto se mantiene constante para los 3 escenarios.

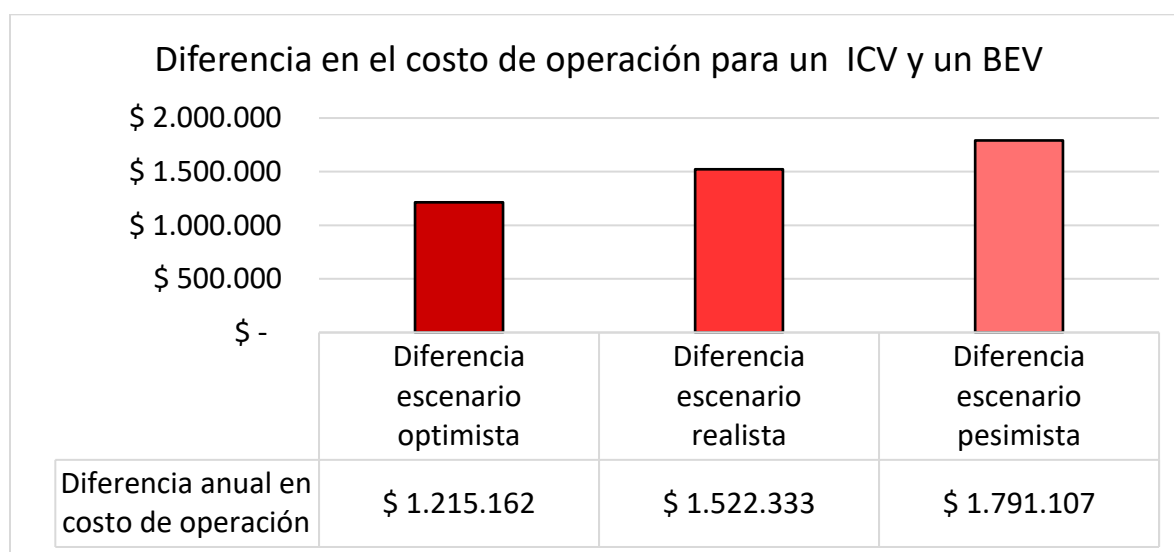


Figura 30. Diferencia en el costo de operación para un ICV y un BEV, para los 3 escenarios calculados.

La diferencia que se muestra en la Figura 30 en otras palabras representa el aumento del costo de operación que se genera al reemplazar un ICV por un BEV. No obstante, se puede ver que el aumento en el

costo es menor para el escenario optimista. O sea que cuanto mayor sea el nivel de actividad o el uso del vehículo eléctrico mejor serán los indicadores de proyecto.

Si bien los resultados indican que un BEV es significativamente más costoso que un ICV existen otras consideraciones desde el punto de vista económico que es difícil expresar, dado que responden a la previsión de gastos futuros y una inversión en desarrollo. Una consideración importante es el desarrollo de capacidades que se pagaría con esta diferencia. Otro beneficio es la mejora en la imagen de la empresa, que puede medirse con apariciones en medios de comunicación y prensa. Además, la realización del proyecto de reemplazo se ajusta con los objetivos de desarrollo sustentable de la empresa (Aguas Andinas, 2016).

### *Costo del proyecto de reemplazo 2018*

En esta sección se presentan los resultados para la evaluación económica del proyecto. Se analiza las opciones de contrato de leasing operativo para 84 vehículos de la flota de Aguas que terminan su contrato actual el año a principios del año 2018 (entre enero y mayo de 2018).

Se presentan 2 alternativas de contrato las que se comparan con el contrato actual. La alternativa 1 considera aumentos de plazo de contratación para vehículos con poco kilometraje, y cambios de categoría 1 hacia las categorías 2 y 4. La alternativa 2 contempla esos cambios y además 10 de los furgones de la categoría 4 serían eléctricos, se identifican como categoría 4e. Estas alternativas son opciones para presentar como propuesta de adjudicación.

*Tabla 14. Número de vehículos por categoría y por plazos de contratación del contrato actual y las 2 alternativas para contratos 2018.*

| <b><i>Categoría de Vehículos</i></b>          | <b>Vehículos<br/>Contrato Actual<br/>[unidades]</b> | <b>Vehículos<br/>Alternativa 1<br/>[unidades]</b> | <b>Vehículos<br/>Alternativa 2<br/>[unidades]</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Categoría 1 Camionetas Cabina Simple          | 3                                                   | 0                                                 | 0                                                 |
| Categoría 2 Camionetas Doble Cabina 4x2       | 18                                                  | 20                                                | 20                                                |
| Categoría 3 Camionetas Doble Cabina 4x4       | 7                                                   | 7                                                 | 7                                                 |
| Categoría 3B Camionetas Doble Cabina 4x4 A.M. | 5                                                   | 5                                                 | 5                                                 |
| Categoría 4 Furgones Pequeños                 | 34                                                  | 35                                                | 25                                                |
| Categoría 4e Furgones Pequeños Eléctricos     | 0                                                   | 0                                                 | 10                                                |
| Categoría 5 Furgones Medianos                 | 17                                                  | 17                                                | 17                                                |
| Categoría 6 Camiones Pequeños                 | 0                                                   | 0                                                 | 0                                                 |
| <b>Total</b>                                  | <b>84</b>                                           | <b>84</b>                                         | <b>84</b>                                         |

| <b><i>Plazos de Contratación</i></b> | <b>Vehículos<br/>Contrato Actual<br/>[unidades]</b> | <b>Vehículos<br/>Alternativa 1<br/>[unidades]</b> | <b>Vehículos<br/>Alternativa 2<br/>[unidades]</b> |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 12 meses                             | 0                                                   | 0                                                 | 0                                                 |
| 24 meses                             | 45                                                  | 44                                                | 40                                                |
| 36 meses                             | 39                                                  | 32                                                | 26                                                |
| 48 meses                             | 0                                                   | 8                                                 | 8                                                 |
| 60 meses                             | 0                                                   | 0                                                 | 10                                                |
| <b>Total</b>                         | <b>84</b>                                           | <b>84</b>                                         | <b>84</b>                                         |

El resultado más importante de esta evaluación se presenta al comparar los costos totales de operación normalizados por el número de vehículos y meses de contratación, de esta forma se puede comparar las alternativas 1, 2 y el contrato actual, las que presentan diferentes tipos de vehículos a diferentes plazos de contratación. El **costo normalizado del contrato actual es \$534.173 [CLP/vehículos/mes]**, el **costo normalizado de la Alternativa 1 presenta un ahorro de 14,67%**, mientras que el **costo normalizado de la Alternativa 2 presenta un aumento de solo 3,17%**. Esto indica que la Alternativa 2, que considera 10 vehículos eléctricos a un precio de leasing operativo de 20[UF/mes] es casi igual que el contrato actual. Esto presenta un escenario donde la integración de vehículos eléctricos tiene costo adicional muy bajo. El costo operación de ambas alternativas se reduce gracias a los cambios en los plazos de contratación para los vehículos subutilizados, adicionalmente en la alternativa 2 los 10 vehículos eléctricos serían contratados a 60 meses, lo que también contribuye a reducir el costo de operación normalizado. En la Tabla 15. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación. se presenta el detalle de los costos normalizados de leasing, energía y total de operación, además de la variación en relación con el costo del contrato actual. Se presenta también en información de manera gráfica en la Figura 31. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación.

Tabla 15. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación.

| <i>*Costos normalizados</i>                               | <b>Contrato Actual</b> | <b>Alternativa 1</b> |                        | <b>Alternativa 2</b> |              |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------|
|                                                           |                        |                      | Variación <sup>5</sup> |                      | Variación    |
| <i>Costo leasing [CLP/Mes/Vehículo]</i>                   | \$ 432.626             | \$ 357.139           | -17,45%                | \$ 464.923           | 7,47%        |
| <i>Costo energía (combustible) [CLP/Mes/Vehículo]</i>     | \$ 101.547             | \$ 98.682            | -2,82%                 | \$ 86.188            | -15,12%      |
| <b><i>Costo total de operación [CLP/Mes/Vehículo]</i></b> | <b>\$ 534.173</b>      | <b>\$ 455.822</b>    | <b>-14,67%</b>         | <b>\$ 551.111</b>    | <b>3,17%</b> |

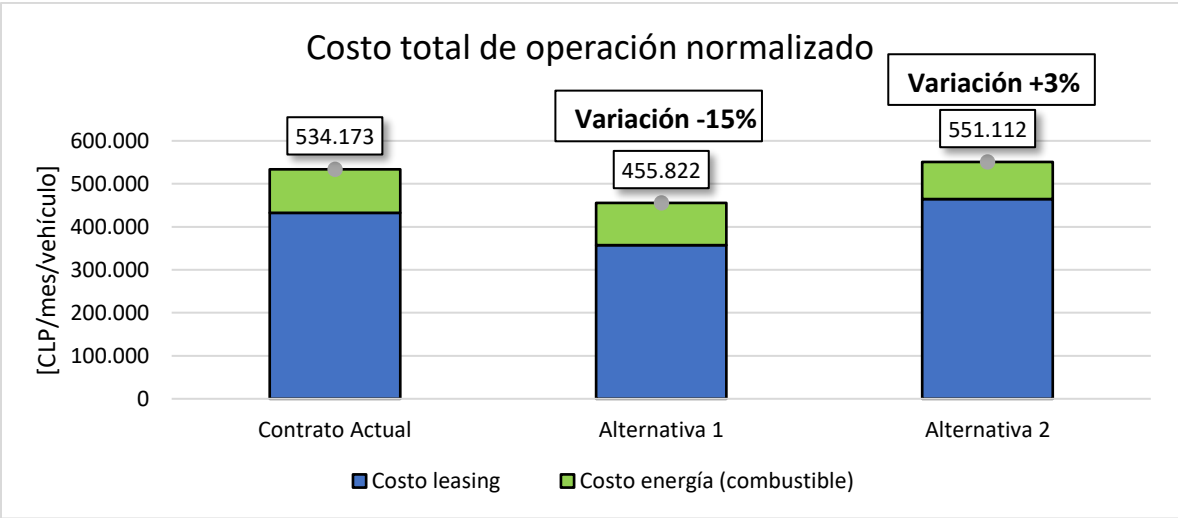


Figura 31. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación.

<sup>5</sup> Variación respecto del contrato actual

Para los 84 vehículos operacionales que vencerá el 2018, el **costo del leasing fue de \$ 1.066.855.917 [CLP]**. Se estimo el **costo de energía (combustible) en \$ 250.415.865 [CLP]** para el plazo completo de los contratos. Sumando, para los 84 vehículos el **costo total de operación fue \$ 1.317.271.782 [CLP]**. Como se ve en la Tabla 14 los contratos tenían plazo de 24 y 36 meses. Para las alternativas se estima el costo del contrato, costo de energía y costo total de operación, realizando las acomodaciones. Además, se asume un precio para los furgones eléctricos de 20 [UF/mes/vehículo]<sup>6</sup>. En la Figura 32 a continuación, se muestra los valores estimados para las alternativas y el contrato actual. Este costo es que total para toda la duración del contrato de los vehículos.

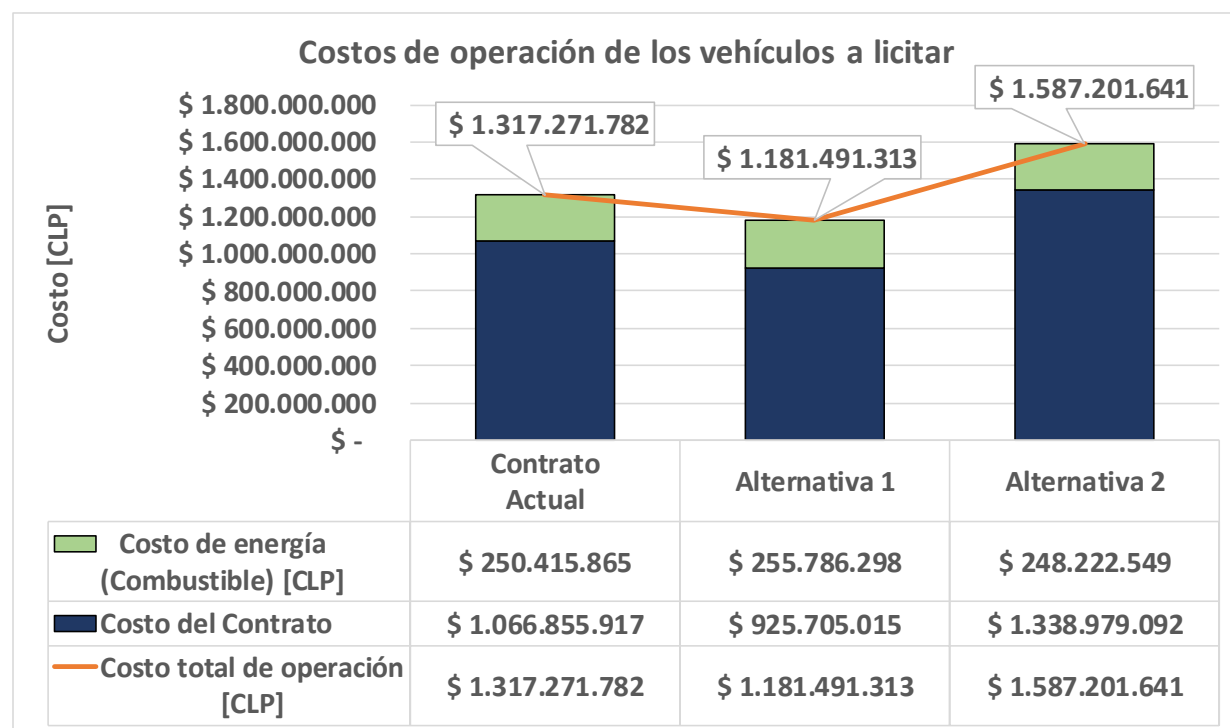


Figura 32. Costos de operación de los vehículos a licitar

Para poder entender la variación se presenta en la Tabla 16 el costo total de operación para un rango de costo de leasing para furgones eléctricos de 20 a 10 [UF/mes/vehículo] y con un número de furgones eléctricos desde 10 hasta 20. Las celdas más rojas representan un costo más alto y se presenta en negrita el costo para 2018. De esta forma se puede ver que para costo de leasing mayor o igual a 16 el costo total de operación normalizado si aumenta la cantidad de vehículos eléctricos. a medida que aumenta el número de furgones eléctricos. Pero cuando el costo de leasing es menor que 16 el costo total de operación normalizado se reduce con cada furgón eléctrico que se integra a la flota. Esta situación se da porque el costo de la energía compensa el aumento en el costo de leasing.

<sup>6</sup> Este valor fue estimado por el coordinador de Gestión de flota, luego de conversaciones con el proveedor Hertz.

Tabla 16. Sensibilidad del costo total de operación normalizado, según número de vehículos y costo leasing

|                               |    | Costo leasing por vehículos [UF/mes/vehículo]           |            |            |            |            |            |            |
|-------------------------------|----|---------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                               |    | 20                                                      | 18         | 16         | 15         | 14         | 12         | 10         |
|                               |    | Costo total de operación normalizado [CLP/mes/vehículo] |            |            |            |            |            |            |
| Número de furgones eléctricos | 10 | \$ 551.112                                              | \$ 540.005 | \$ 528.898 | \$ 523.344 | \$ 517.791 | \$ 506.684 | \$ 495.577 |
|                               | 11 | \$ 553.392                                              | \$ 541.275 | \$ 529.159 | \$ 523.100 | \$ 517.042 | \$ 504.925 | \$ 492.808 |
|                               | 12 | \$ 555.535                                              | \$ 542.426 | \$ 529.316 | \$ 522.761 | \$ 516.206 | \$ 503.096 | \$ 489.986 |
|                               | 13 | \$ 557.878                                              | \$ 543.791 | \$ 529.704 | \$ 522.660 | \$ 515.617 | \$ 501.530 | \$ 487.443 |
|                               | 14 | \$ 558.861                                              | \$ 543.933 | \$ 529.006 | \$ 521.542 | \$ 514.078 | \$ 499.150 | \$ 484.222 |
|                               | 15 | \$ 560.990                                              | \$ 545.122 | \$ 529.255 | \$ 521.322 | \$ 513.388 | \$ 497.521 | \$ 481.654 |
|                               | 16 | \$ 562.989                                              | \$ 546.197 | \$ 529.405 | \$ 521.010 | \$ 512.614 | \$ 495.822 | \$ 479.030 |
|                               | 17 | \$ 562.545                                              | \$ 545.753 | \$ 528.961 | \$ 520.566 | \$ 512.170 | \$ 495.378 | \$ 478.586 |
|                               | 18 | \$ 566.981                                              | \$ 548.654 | \$ 530.328 | \$ 521.164 | \$ 512.001 | \$ 493.675 | \$ 475.348 |
|                               | 19 | \$ 567.422                                              | \$ 548.278 | \$ 529.135 | \$ 519.563 | \$ 509.991 | \$ 490.848 | \$ 471.704 |
|                               | 20 | \$ 567.422                                              | \$ 548.278 | \$ 529.135 | \$ 519.563 | \$ 509.991 | \$ 490.848 | \$ 471.704 |

Del mismo modo presentado en la Tabla 16, se presenta en la Tabla 17 la diferencia porcentual entre el costo de la Alternativa 2 considerando variaciones de número y costo de leasing de los furgones eléctricos. Se muestra en tonos de rojo y con signo positivo cuando el costo es mayor que el contrato actual, y en tonos de azul y con signo negativo cuando el costo total de operación normalizado de la Alternativa 2 es menor que el costo total de operación normalizado del contrato actual. Se puede ver que si el costo de leasing baja de 17 [UF/mes/vehículo] la Alternativa 2 sería más barata que el contrato actual, más específicamente, para 10 furgones eléctricos a un costo de leasing de 16,95 [UF/mes/vehículo] la Alternativa 2 tiene el mismo costo total de operación normalizado que el contrato actual.

Tabla 17. Diferencia porcentual del costo total de operación normalizado entre el contrato actual y Alternativa 2.

|                               |    | Costo leasing por vehículos [UF/mes/vehículo]                                             |       |       |        |        |        |         |
|-------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
|                               |    | 20                                                                                        | 18    | 17    | 16     | 14     | 12     | 10      |
|                               |    | Diferencia costo total de operación normalizado entre contrato actual y Alternativa 2 [%] |       |       |        |        |        |         |
| Número de furgones eléctricos | 10 | 3,17%                                                                                     | 1,09% | 0,05% | -0,99% | -3,07% | -5,15% | -7,23%  |
|                               | 11 | 3,60%                                                                                     | 1,33% | 0,20% | -0,94% | -3,21% | -5,48% | -7,74%  |
|                               | 12 | 4,00%                                                                                     | 1,54% | 0,32% | -0,91% | -3,36% | -5,82% | -8,27%  |
|                               | 13 | 4,44%                                                                                     | 1,80% | 0,48% | -0,84% | -3,47% | -6,11% | -8,75%  |
|                               | 14 | 4,62%                                                                                     | 1,83% | 0,43% | -0,97% | -3,76% | -6,56% | -9,35%  |
|                               | 15 | 5,02%                                                                                     | 2,05% | 0,56% | -0,92% | -3,89% | -6,86% | -9,83%  |
|                               | 16 | 5,39%                                                                                     | 2,25% | 0,68% | -0,89% | -4,04% | -7,18% | -10,32% |
|                               | 17 | 5,31%                                                                                     | 2,17% | 0,60% | -0,98% | -4,12% | -7,26% | -10,41% |
|                               | 18 | 6,14%                                                                                     | 2,71% | 1,00% | -0,72% | -4,15% | -7,58% | -11,01% |
|                               | 19 | 6,22%                                                                                     | 2,64% | 0,85% | -0,94% | -4,53% | -8,11% | -11,69% |
|                               | 20 | 6,22%                                                                                     | 2,64% | 0,85% | -0,94% | -4,53% | -8,11% | -11,69% |

Ahora si se compara con la Alternativa 1 y la Alternativa 2 para todas las combinaciones analizadas el costo de la alternativa 2 es mayor.

De esta evaluación se puede ver que existe condiciones cercanas a la situación actual donde el proyecto tiene un costo adicional 0.

Una segunda conclusión importante es que la evaluación 2017 contradice los resultados de la evaluación 2016. Es importante tomar perspectiva ya que las evaluaciones fueron realizadas con distintos métodos y distintos valores para los costos de leasing. Sin embargo, la evaluación 2017 considera una estimación del nivel de actividad análisis más disgregado que la versión 2016.

Finalmente, en el caso de ejecutarse la Alternativa 1 se lograría un menor costo total de operación, pero sin generar ningún valor agregado que apunte a cumplir con los objetivos de desarrollo sustentable de la empresa. Por el contrario, de ejecutarse la Alternativa 2, el proceso de licitación tiene posibilidad de lograr el mismo o incluso menor costo que el contrato actual (por finalizar el 2018) y además generar un valor agregado aportando a los objetivos de sustentabilidad de la empresa y además con la posibilidad de aportar en imagen corporativa, gracias a mejorar la percepción de la comunidad.

#### *Propuesta de contenidos para difusión.*

Las principales recomendaciones para Aguas Andinas en la difusión de su flota eléctrica se listan fueron presentadas en la versión 2016 de este estudio. Se presenta a continuación un resumen de las recomendaciones (Aguas Andinas, 2016).

- **Evaluar el diseño de un sello o logo del programa** al cual se enmarque el proyecto de electromovilidad, el cual podría ser incorporado en distintos elementos que emplea Aguas Andinas para interactuar con sus clientes y la comunidad que sirve, por ejemplo, la cuenta de agua, el mismo vehículo eléctrico u otro relevante.

- **Priorizar la imagen corporativa en vez de recargar los vehículos eléctricos con mensajes e íconos alusivos a electromovilidad.** Emplear mensajes simples y claros respecto del uso de los vehículos eléctricos (“Cero Emisión”, “Vehículo Eléctrico”).
- Se recomienda considerar la medida cultural de **conducción eficiente** como difusión interna y para involucrar a los colaboradores en su rol para combatir el cambio climático y también para sacarle el mejor rendimiento a las tecnologías vehiculares, tanto de cero emisiones como convencionales.

A continuación, se presenta los aspectos más importantes del proyecto de reemplazo los que aportan a la comprensión de este y a difundir sus impactos y beneficios.

### 1. “Un transporte más eficiente y con cero emisiones<sup>7</sup>”

Aguas Andinas presenta una declaración explícita de compromiso con el desarrollo sostenible de Chile y sus ciudadanos y se plantea el objetivo de ser la primera empresa chilena global de multiservicios en la gestión sostenible de los recursos. Con esto, se espera contribuir con los objetivos del país en reducción de emisiones CO<sub>2</sub> y a profundizar el desarrollo social, la integración, y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos (Aguas Andinas, 2016). Por lo tanto, la difusión de sus actividades para cumplir con estos lineamientos debe alinearse con el discurso aunado de desarrollo sostenible.

En el Reporte de Sustentabilidad 2016 la iniciativa de autos eléctricos se presenta como parte del Plan de Eficiencia Energética, el que reporta en términos del consumo de energía. Se presenta en la tabla a continuación la línea base y la reducción de energía por la incorporación de vehículos eléctricos.

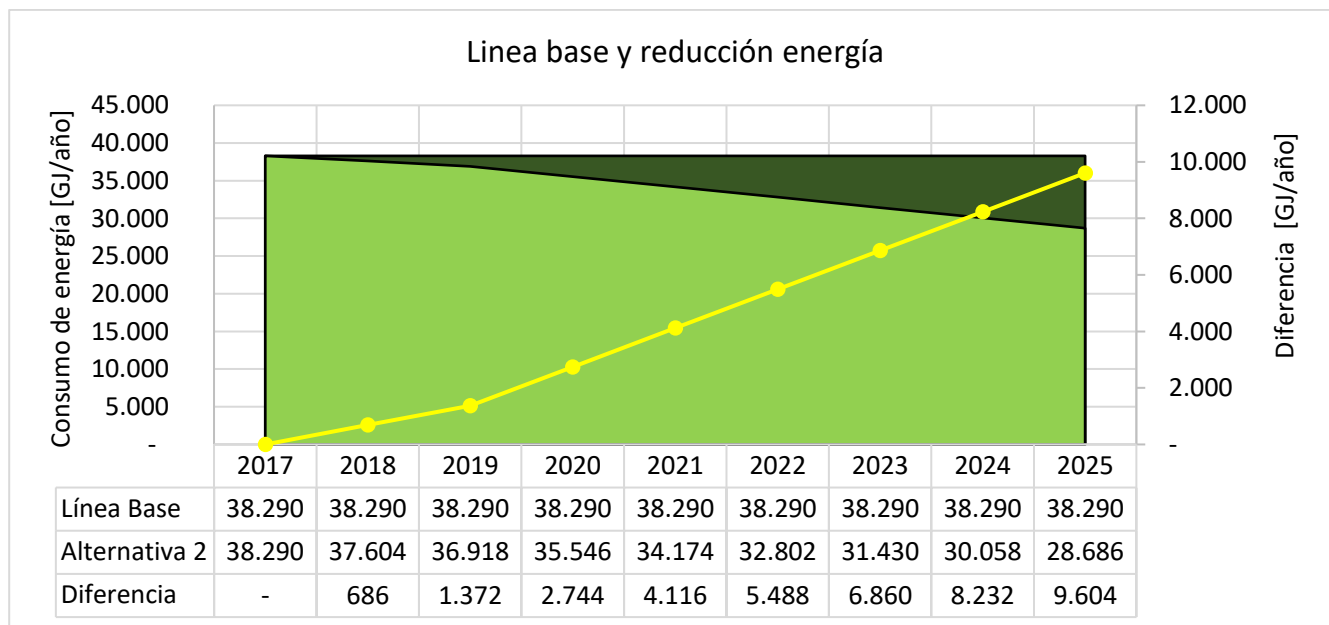


Figura 33. Línea base y reducción de energía de la flota de Aguas.

En concreto el proyecto de reemplazo de 10 furgones eléctricos tendrá una reducción en el uso de energía de 686 [GJ/año] lo que al final del contrato de 60 meses equivale a una reducción de 3.430 [GJ]. Del

<sup>7</sup> Cero emisiones locales. Esto es cero emisiones globales en la medida que la generación de la electricidad se realiza por energía renovables.

mismo modo el proyecto tendrá una reducción de 51 [tonCO<sub>2</sub>/año] que acumulado por la duración del contrato equivaldrá a 255 [tonCO<sub>2</sub>/año]. Se espera aumentar esta reducción de energía y de emisiones con la integración de cada vez más vehículos eléctricos.

## 2. “Más Vehículos eléctricos sin gastar de más”.

Uno de los principales resultados de este estudio es la definición de un panorama donde el reemplazo de vehículos eléctricos presenta a la empresa el mismo costo que el contrato actual. Esto es revolucionario en la medida que supone una paridad en costo para alternativas de contratación de leasing operacional.

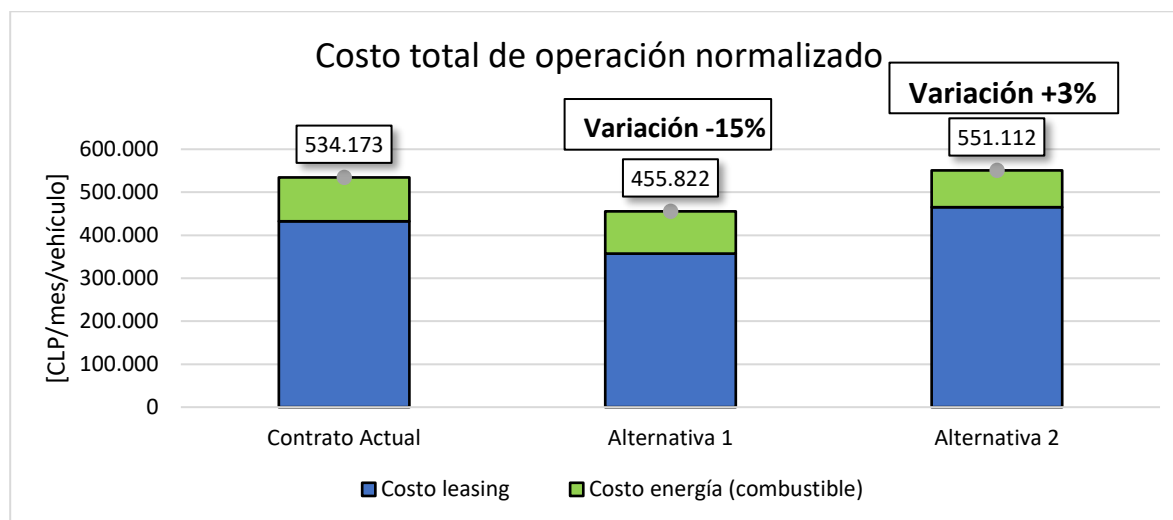


Figura 34. Costos normalizados por vehículos y mes de contratación.

Se estima que para 2022 se logre la paridad en el costo de propiedad de un vehículo eléctrico (EVI, 2017), sin embargo, para esta evaluación las condiciones del leasing, el nivel de actividad de los vehículos y modificaciones del régimen de vehículos convencionales permite tener un aumento del costo menor al 5%. Se espera reducir aún más el costo de leasing operacional de los furgones eléctricos, logrando una diferencia 0 o incluso una reducción del costo operacional de la flota en el futuro cercano.

## 5 CONCLUSIONES

---

Se presentan las principales conclusiones relacionadas con cada uno de los capítulos de este trabajo de título para luego realizar recomendaciones para próximos trabajos y estudios referentes a los vehículos eléctricos, la contaminación atmosférica, el estudio de flotas vehiculares entre otros.

Respecto de objetivo general se concluye los vehículos eléctricos demuestran un desempeño suficiente para la operación de la empresa. No obstante existen consideraciones como la degradación de la batería y el nivel de actividad diaria, que podrían influir y el desempeño de estos vehículos como parte de la flota.

### 5.1 ESTADO DEL ARTE

No ha sido simple lograr un vehículo eléctrico que tenga la posibilidad de igualar las prestaciones de los vehículos de combustión interna. En un proceso que llevó desde el primer auto eléctrico a comienzos del siglo XIX hasta llegar a una flota mundial de 3 millones y con un crecimiento sostenido en los últimos 8 años. Actualmente los vehículos eléctricos han tenido un desarrollo que les permite competir con los vehículos de combustión interna. Sin embargo, la competencia no es fácil y existe un apoyo diverso de los sectores público y privado para impulsar el recambio de flotas contaminantes, arguyendo sus beneficios en emisiones, eficiencia energética y reducción de costos.

Grandes fabricantes de automóviles han anunciado avances en la producción de vehículos eléctricos. Mientras que algunas naciones europeas han declarado sus intenciones de convertir el 100% de sus flotas. En Chile existe ejemplos de colaboración público-privada como la NAMA Zona Verde para el Transporte y otros ejemplos principalmente privados como el programa “Mas verde” de Enel, los buses eléctricos VULE y METBUS y los furgones de la flota operativa de Aguas Andinas.

Es importante que los motores para vehículos eléctricos tengan una alta densidad de potencia, alto torque a bajas velocidades, amplio rango de velocidad, baja inercia, alto rendimiento y bajo costo de mantenimiento. Los motores más ampliamente usados son los de motores sincrónicos de imanes permanentes (PMSM) por tener una construcción simple y robusta con alta eficiencia. Como alternativas existen los motores de rotor bobinado (SPSM) y los motores de inducción (IM). Uno de los grandes beneficios que presentan los motores eléctricos es la posibilidad de recuperar parte de la energía del movimiento gracias a los frenos regenerativos.

En tanto las baterías son el elemento actualmente más crítico de los vehículos eléctricos dado que representan la parte más costosa del vehículo. Respecto a la composición química, las baterías de litio son las que actualmente han logrado la capacidad energética y peso requeridos para un vehículo eléctrico. Actualmente existe una activa investigación para baterías con mayor capacidad energética a peso reducido, pero también poniendo foco en la seguridad frente a accidentes y a un manejo sustentable de los compuestos tóxicos y contaminantes. Otro factor relevante es su vida útil que se asocia a la cantidad de ciclos de carga y descarga antes de que la batería pierda la capacidad de almacenar la energía. En términos de costos las baterías alcanzan el 50% del costo un EV. Estos han logrado precios competitivos entre otras razones por la reducción del costo de las baterías a menos de 300 [USD/kWh] y densidades de energía de casi 350 [Wh/L].

Respecto de la carga cabe mencionar que los tipos de carga más ampliamente usada son de corriente alterna y llamados AC1, AC2 y AC3. Estos se ordenan por potencia de menor a mayor y ofrecen desde cargas lentas nocturnas y principalmente domiciliarias hasta cargas rápidas de menos de una hora. El desarrollo de los cargadores apunta a potencias más grandes con el fin de abastecer baterías cada vez más grandes y a la vez en un tiempo reducido.

Los vehículos eléctricos tienen la ventaja de poder reemplazar el combustible ineficiente y contaminante de los vehículos de combustión interna por el uso de la electricidad, que tiene cero emisiones locales y que puede ser generada de forma sustentable. Otra ventaja es su simplicidad técnica, con pocas partes móviles en comparación con los ICVs lo que se traduce en un bajo costo de mantenimiento. Y además poseen una alta eficiencia que se traduce en bajo costo de operación. Desde el punto del sistema eléctrico los vehículos eléctricos ofrecen una gran oportunidad para almacenar energía de forma distribuida. No menor resulta el beneficio de la reducción de ruido. Desde un punto de vista nacional una masificación de los vehículos podría traer beneficios económicos por el aumento de la demanda de cobre y litio. Como desventaja puede mencionarse, actualmente tienen un alto costo de inversión comparado con un ICV de la misma gama y prestaciones, ya que para la industria aun es más costoso lograr autonomías similares a un ICV. Finalmente cabe mencionar también que para poder realizar cargas cada vez más rápido el costo y complejidad de los cargadores debe aumentar en concordancia.

Los vehículos eléctricos llegan a 3 millones a fines de 2017. China es el país donde su uso está más masificado no solo en el segmento automóviles, sino que en motos bicicletas y buses. Las ventas, estas llegaron a 750.000 el 2016 y la proporción entre BEVs y PHEV es de 60% y 40% respectivamente. La flota de autos eléctricos ha crecido de forma sostenida desde 2010 y se espera que continúe así en los próximos años. Es posible ver que existe varios países donde la penetración ha sido más rápida, y es destacable el caso de Noruega, donde los autos eléctricos llegan al 29% del total nacional.

Las flotas comerciales pueden diferenciarse por transportar personas o mercancías, o según la cantidad de peso transportado. Para las flotas comerciales es importante lograr su operación con bajos costos y así maximizar sus beneficios. Además, un mercado dinámico supone una mejora constante en la calidad del servicio y para reducir las emisiones contaminantes. Para dimensionar las flotas es valioso el uso del concepto pasajero kilómetro y tonelada kilómetro que cuantifica la capacidad de transporte de una flota.

En Chile existe ejemplos del uso de vehículos eléctricos en flotas comerciales. Entre estos se nombra la flota operativa de Aguas Andinas, los camiones eléctricos de la flota de reparto de CCU y además de los buses eléctricos circulando para VULE, METBUS. Una iniciativa importante es la NAMA Zona Verde para Transporte que en su implementación piloteo 3 taxis eléctricos y 1 bus eléctrico. En el extranjero existe ejemplos de flotas mucho más masivas, donde destacan la Flota de Le Groupe La Poste con cerca de 35.000 vehículos eléctricos que representan el 46% de la flota completa.

Existe varias maneras de abordar el estudio del desempeño de un vehículo. Desde un punto de vista técnico es relevante estudiar variables operacionales como la velocidad y la posición para de esta forma abordar el uso y la eficiencia energética. Con información sobre la velocidad, aceleración y altitud, es posible estudiar la potencia desarrollada por el vehículo y abordar la exigencia para un vehículo. Es relevante el estudio de la potencia específica vehicular que permite cuantificar la energía ocupada por el vehículo y posteriormente calcular la energía total utilizada en cierta operación.

## 5.2 METODOLOGÍA

La metodología general de este estudio consiste en 3 grandes partes. La caracterización de la flota y la medición de la operación de los vehículos eléctricos es el primer paso para recoger información sobre la que se realiza los análisis. Posteriormente el procesamiento y análisis de la información generara los principales resultados y conclusiones del desempeño de los vehículos. La tercera parte consiste en la presentación de los resultados para la empresa Aguas Andinas solicitante del estudio “Evaluación de impactos y beneficios asociado a reemplazo de flota vehicular convencional por vehículos eléctricos 2017”

Para la caracterización de la flota la información relevante se solicitó a la empresa bases de datos de la flota operativa y en específico de los vehículos eléctricos operando, información comercial de la flota y una definición del vehículo candidato al reemplazo.

Para la medición de la operación real se definió realizar el seguimiento de los vehículos en su operación cotidiana con una unidad VAM que registra en cada segundo las variables de operación registrándolas en formato digital para su posterior procesamiento. Los vehículos a considerados en el estudio son 5. 2 vehículos eléctricos del centro operacional Lo Prado y del edificio Corporativo acompañados de 3 vehículos diésel que realizan labores similares y serán analizados de forma comparativa. El procesamiento de los datos recolectados se realiza en Microsoft Excel gracias a las facilidades que ofrecen para el manejo de archivos de datos.

## 5.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La información recibida de la empresa Aguas Andinas de manos del coordinador de Gestión de Flota, Cristián Acevedo, contenía una base de datos de los vehículos de la flota. Se detalla los plazos de contratación, los vehículos que requieren recambio durante el año 2018 y las estimaciones desarrolladas previamente para el proceso de recambio.

Luego de constantes esfuerzos por lograr mejoras para su flota operacional se define el proyecto de reemplazo contemplando la integración de 10 furgones eléctricos Citroën E-Berlingo con un plazo de contratación de 60 [meses] y se espera que el costo de leasing sea a lo más 20 [UF/mes/vehículo].

Se realizó pruebas en ruta a 5 vehículos, 2 furgones eléctricos y 3 vehículos diésel. Se midió la operación durante a 3 vehículos (1 BEV y 2 ICV) del centro Operacional Lo Prado entre las fechas 14 y 23 de noviembre de 2016 y el 16 y el 23 de agosto de 2017. Los vehículos del edificio (1 BEV y 1 ICV) Corporativo (1 BEV y 1 ICV) fueron medidos entre el 9 y el 16 de noviembre de 2017. El registro de datos se realizó por con unidades VAM (vehicle activity monitor), las cuales registran información a cada segundo. Se procesó los datos registrados con el fin de considerar solo datos válidos, en específico, se eliminó todos los datos sin conexión de satélite.

La flota de Aguas Andinas está compuesta en su mayoría por vehículos rentados en formato de leasing operacional, y se encuentra diferenciada por su función en vehículos operacionales y vehículos ejecutivos. Dado el recambio constante devenido del leasing, la antigüedad de la mayoría de los vehículos no supera los 3 años. Dentro de los vehículos rentados el 56% son furgones y un 43% camionetas. Los 287 furgones son los candidatos para el reemplazo por furgones eléctricos. Para el año 2018 debe licitarse 87 vehículos de los cuales 41% son furgones pequeños, 20% son furgones medianos y 39% camionetas de

diferentes tipos. Es importante mencionar que en el mercado chileno no existe alternativas de vehículos eléctricos para las categorías furgones medianos y camionetas. De la revisión de la información se pudo calcular que el nivel de actividad proyectado de los furgones es de  $82,83 \pm 44,77$  [km/día].

De la medición de la operación real se obtuvo información válida tan solo para 4 vehículos dado que ocurrió una falla en la unidad VAM destinada a la medición del ICV1 en la campaña de medición del año 2017. De las mediciones exitosas se obtuvo registro de los movimientos de los vehículos de duración variada. Cabe mencionar que el periodo de medición fue relativamente corto dado que la baja utilización de los vehículos eléctricos evita que una semana sea un periodo representativo de su operación general.

Para el vehículo BEVA se registró 23:03 horas, para el vehículo ICVA el tiempo fue de 07:43 horas, para BEV1 se registró 06:43 y finalmente para BEV2 e ICV2 se registró 04:07 horas y 02:16 respectivamente. Además, la velocidad promedio ronda entre 13 y 21 [km/h] pero los datos presentan una alta desviación estándar de la media, tanto que supera la media. Esto indica que la si bien la velocidad media no es un buen representante de la operación de los vehículos. Respecto de la altitud registrada esta es coincidente con la altitud de los lugares visitados por los vehículos. Estos presentan una altitud que varía entre los 490 [m.s.n.m.] y los 750 [m.s.n.m.].

Los vehículos medidos se movieron por la ciudad de Santiago en rutas libres. Se registró el movimiento principalmente por varias comunas de la zona norte y centro de la capital, pero también salidas que llegaron incluso a la comuna de Puente Alto. Los vehículos usaron tanto calles pequeñas como grandes avenidas y también usaron las autopistas como Vespucio Norte, Vespucio Sur, Autopista Central y Costanera Norte.

Los vehículos presentaron velocidad que en su media no supera los 21 [km/h] sin embargo para los distintos movimientos la velocidad registrada llegó en algunos casos hasta los 120 [km/h], aunque la mayor parte del tiempo los vehículos presentaron bajas velocidades. Con esto puede concluirse que el movimiento de los vehículos se realiza principalmente en zonas urbanas con bajas velocidades de circulación con la salvedad de los recorridos por avenidas grandes y autopistas donde la velocidad puede sobrepasar los 60 [km/h]. La mayor cantidad de registros se presenta entre  $-2$  y  $2$  [ $\text{m/s}^2$ ] de aceleración y con velocidad menor a 10 [km/h]. Esta es una característica que se cumple para todos los vehículos medidos. Respecto de la altitud se ve una diferencia altitud que ronda los 100 [m]. Esta situación es coherente con los recorridos de los vehículos ya que la ciudad de Santiago es una ciudad con una pendiente significativa, sobre todo saliendo de la zona centro. Todos estos parámetros de operación permiten calcular una VSP para los vehículos que se mueve entre  $-100$  y  $100$  [W/kg]. La fluctuación para esta variable se debe a la combinación de la potencia requerida para contrarrestar el roce aerodinámico, el roce de rodadura y la potencia para superar tramos de recorrido en subida o bajada y responder a las aceleraciones o frenadas del vehículo. La integración del perfil de VSP para cada vehículo permitió estimar un consumo de energía comparable con la energía suministrada al vehículo y con los kilómetros recorridos. Con esto se calculó valores empíricos de eficiencia y consumo.

El BEVA presentó una eficiencia de 46,97% y un consumo de 0,22 [kWh/km] mientras que este mismo vehículo medido en 2017 (BEV1) presentó valores de 37,07% y 0,26 [kWh/km]. Finalmente, el vehículo BEV2 presentó una eficiencia de 40% y un consumo de 0,60 [kWh/km]. Es importante mencionar que estos valores no son directamente comparables entre ellos dado las diferencias en las tareas realizadas.

Considerando una integración de vehículos eléctricos comenzando con 10 al año 2018, aumentando en 20 cada año hasta el 2025, se obtiene una reducción de CO<sub>2</sub> del 11% sobre la línea base. De manera similar ocurre con NO<sub>x</sub> y la huella del agua que se reducen 10% y 11% respectivamente. Por otro lado, el MP presenta una reducción de 6% debido que este contaminante es producido principalmente por los camiones de la flota, los que no se afectan con el proyecto.

El reemplazo de 10 vehículos genera un 2% de reducción anual en la emisión de CO<sub>2</sub>, mientras que si se reemplazaran 140 furgones convencionales por furgones eléctricos la reducción de CO<sub>2</sub> sería de un 25% y se reemplazara todos los furgones de la flota por vehículos eléctricos la reducción de la emisión de CO<sub>2</sub> sería de 51%. Estas reducciones equivalen a 1,8; 25,7; 52,7 canchas de fútbol plantadas con eucalipto, uno de los árboles que más absorben CO<sub>2</sub>.

Si se compara un furgón convencional con un furgón eléctrico, el costo total del segundo supera al primero para un amplio rango de nivel de actividad. El costo de leasing es mayor para el vehículo eléctrico, tanto que el ahorro en energía no alcanza a compensar la diferencia. El costo de leasing es la variable más influyente y solo puede controlarse en el proceso de licitación y en adelante es fija durante toda la operación de los vehículos. Por otro lado, el costo de energía es variable y depende el uso del vehículo, y los mayores beneficios de los vehículos eléctricos se presentan cuando el vehículo eléctrico tiene una alta utilización.

Un método para poder comparar alternativas de leasing operacional consiste en normalizar el costo total de operación por el número de vehículos y el número de meses del contrato de leasing. Con este método se estimó que la Alternativa 1 de licitación presenta un 15% de ahorro sin contribuir a los objetivos de desarrollo sustentable, mientras que la Alternativa 2, presenta un aumento del costo de 3% pero contribuyendo activamente con los objetivos de desarrollo sustentable, tanto en la eficiencia energética como en la reducción de emisiones.

El proyecto de reemplazo de vehículos puede aportar a la empresa el desarrollo de capacidad en relación con la negociación con los proveedores de leasing operativo, a gestionar mejor la energía de los centros operacionales, mejorar los hábitos de conducción del personal y ocupar la energía cogenerada por la como subproducto. El desarrollo de todas estas capacidades apunta a la eficiencia energética y la reducción de emisiones mencionadas en como parte de la Economía Circular.

Las recomendaciones presentadas en el año 2016 sobre la difusión del proyecto siguen siendo válidas, y proponen la selección de una imagen o sello de electromovilidad que indique de forma simple frases como 100% eléctrico o cero emisiones. Se debe privilegiar la imagen corporativa de los vehículos y agregar el sello a los vehículos eléctricos por sobre recargar de información visual al vehículo.

## 5.4 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio que profundice sobre la medición y el análisis de variables eléctricas en el circuito de los vehículos eléctricos. De esta forma entender en mayor profundidad el funcionamiento tren motor y el sistema de freno regenerativo.
- Se recomienda realizar un estudio que profundice sobre aspectos económicos que permitan entender el modo en que las empresas de leasing estiman los costos sobre los vehículos eléctricos, observando temas como el mantenimiento, vida útil de las baterías y seguros asociados al decremento en el desempeño de los vehículos eléctricos.

- Se recomienda realizar un estudio que profundice sobre el monitoreo de variables de operación tanto de vehículos eléctricos como vehículos de combustión interna. De este modo entender con mayor profundidad el desempeño de los vehículos de la flota.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- Aguas Andinas. (2016). *Reporte de sustentabilidad 2016*.
- Alguacil, M. (27 de Septiembre de 2016). *Así funciona un freno capaz de generar energía*. Obtenido de Corriente Eléctrica Renault: <https://corrienteelectronica.renault.es/asi-funciona-freno-capaz-generar-energia/>
- ANAC. (2016). *Anuario ANAC 2015 2016*.
- BENF. (2017a). *Global EV trends and forecast 2017*. Obtenido de Bloomberg New Energy Finance: <http://www.bnef.com>
- BID. (2015). *Apoyo al diseño de operaciones de mitigación de cambio climático. Estudio de alternativas para la implementación de autobuses eléctricos en Asunción*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Bloomberg. (noviembre de 2017). *The rare-earth metals ETF that's surged 60% this year*. Recuperado el noviembre de noviembre, de <https://www.bloomberg.com/news/videos/2017-11-15/this-rare-earth-metals-etf-has-surged-60-this-year-video>
- BNEF. (2017b). *Electric Vehicle Outlook 2017*. Obtenido de Bloomberg New Energy Finance, : <http://www.bnef.com>
- BYD. (3 de Marzo de 2016). *BYD Firms cooperation with correios, Brazil's postal service and official olympic sponsor*.
- BYD Company. (19 de noviembre de 2016). *BYD Shares Vision for Sustainable Urban Mobility at Habitat III; Provides Electric Transportation for the United Nations Event*. Obtenido de BYD News: <http://www.byd.com/news/news-365.html>
- Caballero, M. (2011). *ANÁLISIS DE EMISIONES DE VEHÍCULOS LIVIANOS SEGÚN CICLOS DE CONDUCCIÓN ESPECÍFICOS PARA LA REGIÓN METROPOLITANA*.
- CAF. (2016). *LÍNEA BASE, SISTEMA DE MRV ZVTS*.
- Cao, J., & Emadi, A. (2011). Batteries Need Electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Volume 5, no 1, March 2011.
- CCU. (2017). *CCU PRESENTA FLOTA DE CAMIONES ELÉCTRICOS COMO PARTE DE SU NUEVO MODELO DE DISTRIBUCIÓN*. Obtenido de CCU: <http://www.ccu.cl/ccu-presenta-flota-de-camiones-electricos-como-parte-de-su-nuevo-modelo-de-distribucion/>
- Chemali, E. (2016). *Electrochemical and Electrostatic Energy Storage and Management Systems for Electric Drive Vehicles: State-of-the-Art Review and Future Trends*, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. .
- Chen, H. (2009). *Progress in electrical energy storage system: A critical review*, *Progress in Natural Science*.

- CNN. (11 de Septiembre de 2017). *China quiere prohibir los carros que funcionan con gasolina y diésel*. Obtenido de CNN en español.
- CORMA. (2015). Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de [http://www.corma.cl/\\_file/material/el-agua-y-las-plantaciones-forestales.pdf](http://www.corma.cl/_file/material/el-agua-y-las-plantaciones-forestales.pdf)
- D. Aggeler, F. C.-D. (2010). Ultra-Fast DC-Charge Infrastructures for EV-Mobility and Future Smart Grids. *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Eur. (ISGT)*.
- D. Bowermaster, M. A. (2017). The need for charging: Evaluating utility infrastructures for electric vehicles while providing customer support. *IEEE Electrification Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 59–67,.
- D. Christen, S. T. (2010). Highly Efficient and Compact DC-DC Converter for Ultra-Fast Charging of Electric Vehicles. *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*.
- DfT. (2014). *The benefits of operatin electric vehicles in an urban environment*. TNT Case Study. Scottish Government, Department for Transport.
- Doppelbauer, M., & Winzer, P. (2017). *A lighter motor for tomorrow's electric car*. IEEE Spectrum. Vol. 54, n°7, pp. 26-31.
- DTPM. (14 de Noviembre de 2017). *Comienza histórica operación de los primeros buses eléctricos de Transantiago*. Obtenido de [www.transantiago.cl](http://www.transantiago.cl/noticias/comienza-historica-operacion-de-los-primeros-buses-electricos-de-transantiago): <http://www.transantiago.cl/noticias/comienza-historica-operacion-de-los-primeros-buses-electricos-de-transantiago>
- Dusmez, A. K. (2012). Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions vol. 61, no. 8,*.
- El Observador. (29 de diciembre de 2015). *Renault entrega 30 Kangoo ZE eléctricas en Uruguay*. Obtenido de <http://www.elobservador.com.uy/renault-entrega-30-kangoo-ze-electricas-uruguay-n713062>
- Electric Power Research Institute (EPRI), T. R. (2007). *Environmental Assesment of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions*.
- EMOL. (22 de Mayo de 2017). *Llega a Chile la flota más grande de autos eléctricos de Latinoamérica: Ya hay 100 en las calles*. Obtenido de EMOL: <http://www.emol.com/noticias/Economia/2017/05/22/859442/Llega-a-Chile-la-flota-mas-grande-de-autos-electricos-de-Latinoamerica-Ya-hay-100-en-las-calles.html>
- EPFL, U. (s.f.). *UFCEV EPFL*. Obtenido de UFCEV EPFL: <http://ufcev.epfl.ch/>
- EVI. (2017). *Global EV Outlook 2017*. <http://www.iea.org/>.
- FedEx. (2016). *EarthSmart*. Recuperado el Noviembre de 2016, de <http://www.fedex.com/es/about/sustainability/earthsmart.html>
- FedEx. (2017). [http://www.fedex.com/ru\\_english/about/sustainability/earthsmart.html](http://www.fedex.com/ru_english/about/sustainability/earthsmart.html). Obtenido de [http://www.fedex.com/ru\\_english/about/sustainability/earthsmart.html](http://www.fedex.com/ru_english/about/sustainability/earthsmart.html)
- Fleet Europe. (21 de febrero de 2017). *La Poste runs largest electric fleet in Europe*. Obtenido de Fleet Europe: <https://www.fleeteurope.com/en/news/la-poste-runs-largest-electric-fleet-europe>

- Garcia-Valle. (2013). *Vehicle Integration into Modern Power Networks*.
- Gnewt. (2016). *Gnewt (Green New Transport) cargo, love the last mile*. Obtenido de <http://www.gnewtcargo.co.uk/>
- Grbovic, P. J. (2014). *Ultra-Capacitor in Power Conversion Systems*. Wiley.
- Helbig, C., Bradshaw, A. M., Wietschel, L., Thorenz, A., & Tuma, A. (2018). Supply risks associated with lithium-ion battery materials. *Journal of Cleaner Production*, 274-286.
- iea. (2018). *International Energy Agency*. Obtenido de History: <https://www.iea.org/about/history/>
- InsideEVs. (2013). *Orange to buy 200 electric vehicles from Renault-Nissan for car Sharing Program in France*.
- ISSRC. (2011). The VAM Unit Instructional Booklet.
- ISSRC. (s.f.). *ISSRC*. Obtenido de <http://issrc.org/>
- J. Sexauer, K. M. (2013). Applications of probability model to analyze the effects of electric vehicle chargers on distribution transformers. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 847–854, .
- J. T. Salihi. (1973). Energy Requirements for Electric Cars and Their Impact on Electric Power Generation and Distribution Systems. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-9, no. 5, pp. 516–532,.
- Jahns, T. (1987). *Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive*". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-23, No. 4, july/aug. 1987.
- Jahns, T. (2017). *Getting rare-earth magnets out of EV traction machines: a review of the many approaches being pursued to minimize or eliminate rare-earth magnets from future EV drivetrains*. IEEE Electrification Magazine. Vol. 5, No. 1, March.
- K. Qian, C. Z. (2011). Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 802–810.
- King, e. a. (2008). Water Intensity of Transportation. *Environmental Science & Technology*.
- Komatsu. (2015). *980E-4 Electric Drive Truck*. Obtenido de <http://www.komatsuamerica.com/equipment/trucks/electric/980e-4>
- L. Dickerman and J. Harrison. (2010). A New Car, a New Grid. *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 55–61.
- Le Groupe La Poste. (2014). *Corporate Social Responsibility Overview*.
- Le Groupe La Poste. (24 de abril de 2018). *Les-vehicules-electriques-de-la-poste*. Obtenido de Le Groupe La Poste: <https://legroupe.laposte.fr/decouverte/les-vehicules-electriques-de-la-poste>
- Mitsubishi. (17 de abril de 2018). *iMiev Enchufalo y conduce*. Obtenido de Mitsubishi motors: <https://www.mitsubishi-motors.es/imiev/#!>
- Morcos, J. G. (2003). Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 3, pp. 975–981.

- Nissan. (17 de abril de 2018). *NISSAN CHILE APUESTA A LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS Y ENTREGA FLOTA DE 25 LEAF A COLABORADORES DE ENEL*. Obtenido de Nissan Leaf: [https://www.nissan.cl/Experiencia\\_nissan/nissan-leaf.html](https://www.nissan.cl/Experiencia_nissan/nissan-leaf.html)
- OppCharge: *Fast Charging of Electric Vehicles*. (2017). Recuperado el 1 de Diciembre de 2017, de <https://www.oppcharge.org/>
- OTUC. (2016). PRIMER SEMINARIO DE TRANSPORTE URBANO DE CARGA – RM. <http://ctl.unab.cl/>.
- P. Fan, B. S. (2015). Operation analysis of fast charging stations with energy demand control of electric vehicles. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1.
- Pham, S. (11 de Septiembre de 2017). China quiere prohibir los carros que funcionan con gasolina y diésel. *CNN*.
- Postal&Parcel. (8 de Marzo de 2013). *FedEx Express hikes vehicle efficiency target after early success*. Obtenido de <http://postandparcel.info/54316/news/environment-news-2/fedex-express-hikes-vehicle-efficiency-target-after-early-success/>
- Rivera, S. K. (2016). Charging Architectures for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. En *Smart Charging Technologies and Applications for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles*. Springer International Publishing.
- Sabihuddin. (2015). *A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies, Energies*, Vol. 8, pp. 172-216.
- Stanford News. (14 de Junio de 2017). Recuperado el 1 de Diciembre de 2017, de <https://news.stanford.edu/2017/06/14/big-advance-wireless-charging-moving-electric-cars/>
- Tesla Motors. (17 de abril de 2018). *About Tesla*. Obtenido de Tesla: <https://www.tesla.com/about>
- TNT. (15 de Mayo de 2008). *TNT builds up its green fleet worldwide*. Obtenido de [http://www.tnt.com/corporate/en/data/press/2008/05/400697TNT\\_builds\\_up\\_its\\_green\\_fleet\\_worldwide.html](http://www.tnt.com/corporate/en/data/press/2008/05/400697TNT_builds_up_its_green_fleet_worldwide.html)
- TNT. (18 de Junio de 2015). *TNT introduces electric express delivery vehicles in Amsterdam y Rotterdam*. Obtenido de <http://www.tnt.com/corporate/en/data/press/2015/06/tnt-introduces-electric-express-delivery-vehicles-in-amsterdam-and-rotterdam.html>
- Tolvét, S. (2009). *ANÁLISIS DE EMISIONES EN RUTA DE VEHÍCULOS DIESEL EN CIUDAD DE*.
- UNAB. (9 de mayo de 2016). *Con éxito se realizó primer seminario del Observatorio de Transporte Urbano de Carga*. Obtenido de <http://ctl.unab.cl/?p=774>
- UPS. (2015). *Committed to More, Corporate Sustainability Report*.
- Yilmaz, M. a. (2013). Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.
- ZeEUS. (2016). *ZeEUS eBus Report. An overview of electric buses in Europe*. Zero Emission Urban Bus System.

