



# Selección de rutas para escalar la operación de buses eléctricos en Santiago de Chile: Recomendaciones para el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones



SUPPORTING PARTNER



FUNDING AGENCY



IMPLEMENTING PARTNERS



Asistencia técnica proveída al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile (MTT) a través del Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) como parte de la iniciativa ZEBRA (*Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator*). El trabajo fue impulsado en un inicio por ONU Medio Ambiente, a través del programa Global Fuel Economy Initiative (GFEI). En este sentido, quisieramos extender nuestros agradecimientos a Rob de Jong, Luis Felipe Quirama y Verónica Ruiz-Stannah de ONU Medio Ambiente.

Este reporte fue elaborado por Marcela Castillo, Sebastián Galarza, Gianni López y Ariel Núñez del Centro Mario Molina Chile, con la colaboración de Andrés Roasenda, Santiago Larraín, Miguel Ormeño y el equipo de la Secretaría Técnica de Estrategia y Planificación del DTPM. El reporte fue revisado por Oscar Delgado, Jennifer Callahan, y Samantha Pettigrew del Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT).



# CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PRESENTACIÓN</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>ANTECEDENTES</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>METODOLOGÍA</b> .....  | <b>7</b>  |
| Análisis de datos de buses georreferenciados.....   | 9         |
| Adquisición de datos y filtrado por ruta .....  | 10        |
| Filtrado por criterios temporales y posición.....   | 11        |
| Propuesta de metodología para el desarrollo de ciclos de conducción representativos por recorridos con información de GPS ..... | 12        |
| Modelación de la operación de BEBs .....  | 14        |
| <b>RESULTADOS</b> .....   | <b>19</b> |
| Ciclos de conducción representativos .....  | 19        |
| Modelación de BEBs .....  | 20        |
| Cálculo de indicadores clave de desempeño (KPIs) .....  | 22        |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....   | <b>26</b> |
| <b>Anexo 1: Consumos de Buses A y B</b> .....   | <b>28</b> |
| <b>Anexo 2: Autonomía de Buses A y B</b> .....  | <b>32</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Metodología general.....   | 7  |
| <b>Figura 2.</b> Resumen del proceso para la construcción de los perfiles de velocidad.....   | 9  |
| <b>Figura 3.</b> Esquema del primer filtro y ordenamiento de los datos a partir del algoritmo diseñado en Python.....   | 10 |
| <b>Figura 4.</b> Ejemplo del filtrado para Ruta 2 ida. En la gráfica izquierda, las posiciones encerradas en un círculo corresponden a saltos del GPS por pérdida de señal, mientras que la línea roja corresponde a la ruta propiamente tal..... | 12 |
| <b>Figura 5.</b> Metodología general para la modelación.....  | 15 |
| <b>Figura 6.</b> Resultados de consumos de energía de la versión 2 del Bus A.....   | 16 |
| <b>Figura 7.</b> Perfiles de la Ruta 3 ida.....   | 19 |
| <b>Figura 8.</b> Tasa de consumo (kWh/km) del Bus A para cada una de las rutas bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.....  | 21 |
| <b>Figura 9.</b> Tasa de consumo (kWh/km) del Bus B para cada una de las rutas bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.....  | 21 |
| <b>Figura 10.</b> Autonomías por carga del Bus A bajo dos condiciones extremas: 30 % de carga de pasajeros sin AC funcionando y 100 % de carga de pasajeros con el AC funcionando.....  | 23 |
| <b>Figura 11.</b> Autonomías por carga del Bus B bajo dos condiciones extremas: 30 % de carga de pasajeros sin AC funcionando y 100 % de carga de pasajeros con el AC funcionando.....  | 23 |
| <b>Figura 12.</b> Distribución de autonomías (km/carga) en el escenario menos exigente: 30 % carga de pasajeros sin AC.....   | 25 |
| <b>Figura 13.</b> Distribución de autonomías (km/carga) en el escenario más exigente: 100 % carga de pasajeros AC.....  | 25 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Resultados de consumos de energías de buses eléctricos testeados en el 3CV y modelados con los buses virtuales (versiones 1 y 2).....    | 16 |
| <b>Tabla 2.</b> Características de buses modelados.....  | 17 |
| <b>Tabla 3.</b> Simulación del consumo de energía de la versión 2 del Bus A bajo distintas condiciones de carga en la Ruta 2.....                        | 17 |
| <b>Tabla 4.</b> Variables de Ruta 3 ida y retorno.....   | 20 |
| <b>Tabla 5.</b> Promedios de tasa de consumo de los Buses A y B bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.....      | 22 |
| <b>Tabla 7.</b> Promedios de autonomías por carga de los Buses A y B bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC..... | 24 |
| <b>Tabla 8.</b> Diferencia de promedios de autonomía bajo distintas condiciones.....   | 24 |

## PRESENTACIÓN

Este reporte presenta los resultados de la asistencia técnica “Consultoría para la determinación del número de buses con el potencial de ser eléctricos para incorporar al Sistema de Transporte Público de Santiago”. Este trabajo es resultado de una colaboración entre el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), que forma parte del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) de Chile, y el Centro Mario Molina Chile (CMM) bajo el auspicio de la iniciativa ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid deployment Accelerator), y ONU Medio Ambiente. Para esta colaboración CMM empleó las metodologías, modelos e información generadas en el marco del proyecto “Annex 53-1: Sustainable Bus System” de la Agencia Internacional de Energía (IEA), del proyecto “Consorcio Tecnológico para la Promoción de la Electromovilidad en el Transporte Público” (CORFO).

El presente informe incluye el análisis de 145 rutas de la malla de Transantiago, con el fin de determinar cuáles poseen mayor potencial para ser operadas con buses eléctricos de baterías (BEBs). El trabajo presenta los resultados del consumo energético de buses urbanos eléctricos en base a una metodología de simulación computacional que ha sido validada internacionalmente. La metodología seguida y los resultados obtenidos pueden resultar útiles para sistemas de transporte público y operadores que planean hacer la transición a BEBs para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes ambientales.

## INTRODUCCIÓN

El Sistema Metropolitano de Transporte Público de Santiago, Chile, ahora denominado Red Metropolitana de Movilidad (RED), está integrado por cerca de 400 servicios que operan una flota de 6.600 buses, y transporta más de 3 millones de pasajeros por día. Esto en una ciudad que presenta desafíos en términos de infraestructura, coordinación institucional y financiamiento.

Para el año 2019, se esperaba un recambio cercano al 47 % de los buses de la red de transporte público, debido a que cuatro de las siete unidades de operación (Inversiones Alsacia S.A., Express de Santiago UNO S.A., Redbus Urbano S.A. y Servicio de Transporte de Personas S.A (STP)) terminaban su periodo de concesión. El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones definió condiciones para la incorporación masiva de buses con tecnologías de baja y cero emisiones que posicionaron al proceso de Licitación de Vías del Transporte Público de Santiago del año 2019 como el primer ejemplo en la región latinoamericana de introducción masiva de buses diésel Euro VI, que en marzo del 2019 llegaba a 490, y de buses eléctricos con baterías, que en el mismo periodo llegaba a 200. Se espera que cerca de 615 buses eléctricos con baterías estén en circulación en 2020 (con los 750 buses adicionales que fueron agregados a la flota entre los finales del 2019 y comienzos del 2020).

Esta introducción masiva de BEBs en Santiago es fruto de un proceso de varios años, durante los cuales se han desarrollado pruebas pilotos a pequeña escala, se han elaborado estudios para generar información técnica útil para el escalamiento, se han generado acuerdos público-privados para los primeros pilotos masivos con una participación activa de empresas de energía y operadores de transporte público, y se ha discutido una visión estratégica para la introducción progresiva de los BEBs y el financiamiento necesario para lograrlo. Este ingreso de BEBs es un aporte importante a los esfuerzos para reducir el problema de contaminación atmosférica de Santiago, donde el transporte público sigue siendo una fuente importante de emisiones. Así mismo, significa un paso concreto en el despliegue de la electromovilidad en Chile y un avance notable a destacar entre los esfuerzos por cumplir los compromisos nacionales en la reducción de gases de efecto invernadero. A su vez, este trabajo se enmarca dentro de los compromisos del CMM para impulsar la electromovilidad con distintos representantes del gobierno, al igual que los enfoques de la estrategia nacional de electromovilidad, la ruta



energética 2018-2022 y los compromisos por parte del gobierno de tener un transporte público de cero emisiones al 2040.

Independientemente de los avances anteriores, el escalamiento a través del proceso de licitación de vías en 2019 requirió de una planificación compleja desde el punto de vista de la integración masiva de los BEBs y sus sistemas de recarga en la definición de las condiciones operacionales de los servicios a licitar y de los requerimientos tecnológicos a las flotas.

Por lo anterior esta investigación resulta de importancia para la Secretaría Técnica del DTPM en el diseño de los procesos de licitación iniciados a partir de 2019, y en particular de la licitación de suministradores de flota<sup>1</sup> y de la preparación de las bases técnicas de operadores que se licitarán a continuación. Ambos procesos permitirán la renovación de 2.000 buses, con incentivos muy fuertes para que los vehículos que ingresen a la flota sean eléctricos, debido a que el proceso otorgará mayor puntaje a los buses que posean menor MJ/km, además de un aumento en los años de contrato para los operadores y suministradores de buses que presenten propuestas con flotas (>50 %) eléctricas.

Este estudio es fruto del apoyo de varias instituciones internacionales al DTPM, y busca aportar las mejores metodologías e información posibles al proceso de definición de las bases de licitación.

---

<sup>1</sup> Directorio de Transporte Público Metropolitano (2019). *Servicio Complementario de suministro de buses para el Sistema de Transporte Público Metropolitano*. <http://www.dtpm.cl/index.php/documentosce/licitacion-publica-2019>.

## OBJETIVOS

El objetivo general es determinar el consumo energético de buses eléctricos de carga en depósito a incluir en la licitación de proveedores de flota en el proceso de licitación 2019,<sup>2</sup> a partir de la identificación de los recorridos con mayor potencial de ser electrificados dentro de los 145 facilitados por el DTPM.

Objetivos específicos:

- Analizar la información facilitada por el DTPM con posicionamiento geográfico (GPS) de buses operando en 102 servicios seleccionados por la autoridad.
- Desarrollar un ciclo de conducción representativo de cada una de las rutas estudiadas.
- Desarrollar una metodología para analizar 43 rutas que sufrirán algún cambio en su recorrido en el futuro cercano.
- Identificar, a través de modelación, las condiciones de las rutas y sus impactos en la operación de los buses, incluyendo como aspecto clave el consumo energético. Estas condiciones permitieron identificar cuáles son las rutas más aptas para la operación de buses eléctricos y ajustar los requerimientos para la licitación el proceso de licitación vigente.

---

<sup>2</sup> DTPM. *Servicio Complementario de suministro de buses para el Sistema de Transporte Público Metropolitano.*

## ANTECEDENTES

En relación con la medición y el desarrollo de procedimientos para evaluar el comportamiento de BEBs bajo las condiciones de la ciudad de Santiago, se pueden mencionar dos proyectos relevantes: El anexo 53-1 del programa de colaboración técnica “Advanced Motor Fuels” de la IEA, llamado “Sistema de buses sustentables”,<sup>3</sup> y el Consorcio de Electromovilidad conformado el año 2017 con apoyo de CORFO.

El anexo 53-1 está enfocado en desarrollar metodologías y requisitos para buses limpios y eficientes para su uso en procesos de licitación de operadores de transporte público en ciudades de Latinoamérica. También busca desarrollar recomendaciones para controlar y dar seguimiento a los buses en operación. Para este propósito, se elaboró un ciclo de conducción representativo de los buses urbanos de Santiago y se realizó un programa de medición de buses en laboratorios de vehículos pesados en Finlandia y en Chile, probados bajo las condiciones locales en que operan buses de Santiago. Luego se desarrolló un documento con las recomendaciones para los procedimientos de prueba y el uso del ciclo de conducción. Como resultado, el reporte sirvió para la introducción del Ciclo de Conducción de Santiago como base para las futuras adquisiciones de buses urbanos en Santiago de Chile (Resolución 2243),<sup>4</sup> el cual será utilizado en los próximos procesos de licitación para la determinación del consumo de energía. Esto corresponde a un hito regional ya que no existen los mismos requerimientos para las licitaciones o renovaciones de flotas de buses urbanos en las principales ciudades de la región.

En el caso del Consorcio de Electromovilidad, su objetivo está centrado en la electromovilidad como un bien público y priorizar sus beneficios en el transporte público masivo. Este proyecto fue ejecutado entre los años 2016 y 2017 por CMM y el Centro de Desarrollo Tecnológico de Finlandia (VTT), con el MTT y la Sociedad de Fomento Fabril (SOFOFA) como mandantes, y Enel como apoyo. Esta iniciativa buscó la articulación de actores claves para el desarrollo de una agenda a corto y largo plazo, además de identificar apoyo financiero para la introducción de BEBs. Una de las primeras actividades del consorcio fue identificar las 12 rutas con mayor potencial de ser electrificadas

<sup>3</sup> International Energy Agency. *Advanced Motor Fuels: Map of Projects (Annexes)*. [https://iea-amf.org/content/projects/map\\_projects/53](https://iea-amf.org/content/projects/map_projects/53).

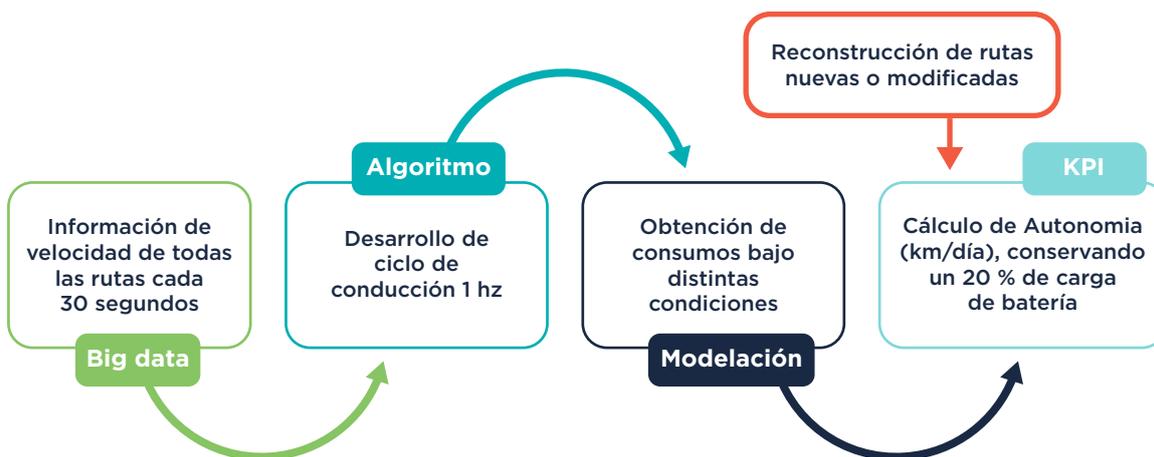
<sup>4</sup> Aprueba Protocolo Técnico para obtener consumo energético en buses de Transporte Público Urbano de la ciudad de Santiago, Resolución 2243 exenta (2018). <http://bcn.cl/26gbi>.



exitosamente, para facilitar la demostración de proyectos piloto que se llevarían a cabo entre los años 2017 y 2019. Como resultado, se determinaron los estados de carga de las baterías para las 12 rutas y se realizaron los costos totales de propiedad (TCO) para servicios con 15 BEBs. A partir de este estudio se pudo concluir que, con las tecnologías de buses y recarga actualmente disponibles, los servicios con mayor potencial son aquellos con recorridos más cortos y frecuencias de buses por hora no muy altas, y ubicados preferentemente en las zonas más planas de la ciudad (Poniente-Centro y Norte-Sur). Los resultados demuestran, además, que existe una variación importante de los TCO entre los distintos servicios considerados en el estudio, pero los costos de los BEBs se muestran consistentemente menores que los de los buses diésel comparados con una base tecnológica de Euro VI.

## METODOLOGÍA

La Figura 1 presenta un diagrama de la metodología general del estudio, donde se integran el procesamiento de datos, la modelación computacional y el análisis de indicadores de desempeño (KPIs). Esta metodología se utilizó para analizar un total de 145 rutas. El diseño de la programación de servicios y determinación de rutas se trabajó en conjunto con el DTPM.



**Figura 1.** Metodología general.

Un desafío importante es la caracterización de la operación en los recorridos de interés para el DTPM, especialmente en el desarrollo de perfiles de velocidad que permitan simular la operación de BEBs. Dadas las restricciones de recursos y tiempo, y ante la imposibilidad de desarrollar una campaña extensa de medición de posicionamiento y velocidad por cada ruta, se empleó una metodología desarrollada en el marco del proyecto, “Sustainable Bus System (Annex 53-1)”, del programa de colaboración técnica de la IEA, “Advanced Motor Fuels”, que permite obtener ciclos de conducción por ruta a partir de la información del GPS de los recorridos.

De las 145 rutas analizadas, 43 rutas no poseían información de sus perfiles de velocidad o ciclos de conducción. Algunas de estas rutas eran totalmente nuevas o habían sido modificadas al compararlas con la información del GPS disponible en el momento, por lo cual se desarrolló una metodología paralela para la reconstrucción de ellas a partir de información existente. A continuación, se presenta una descripción de esta nueva metodología que podrá ser adoptada por el DTPM para futuras modificaciones a rutas para licitaciones actuales o futuras.

a) Ruta nueva 2019

Las rutas nuevas corresponden a trayectos formados por la unión de 2 o más rutas que ya operaban y con las que se contaba estimaciones del consumo. Para estimar el consumo de la nueva ruta se ponderó el consumo de las rutas antiguas con su distancia recorrida. Es decir,

$$C_n = \frac{\sum c_i \times d_i}{\sum d_i}$$

donde  $C_n$  es la tasa calculada de la ruta n nueva,  $c_i$  es el consumo de la ruta i, mientras que  $d_i$  es la distancia recorrida de dicha ruta. La distancia total de la ruta nueva corresponde a la suma de todas las distancias de las rutas antiguas que forman la nueva ruta.

b) Ruta alargada 2019

La ruta alargada corresponde a una ruta con la que se contaba con información del consumo cuyo tramo fue modificado, recorriendo más distancia. Se buscaron otras rutas que recorrieran parte o el total del tramo alargado y se utilizó su información para estimar el nuevo consumo utilizando la misma fórmula anterior.

c) Ruta acortada 2019

Se consideró el mismo consumo del recorrido 2018, acortado a la distancia recorrida en la modificación del 2019.

Finalmente, luego de determinar los consumos de las rutas, se estimó cualitativamente qué tan diferentes podrían ser los consumos de los viajes entre depósitos y cabezales. El estudio fue diseñado así porque los movimientos de los buses una vez fuera de operación de ruta son difíciles de replicar, en particular en sus trayectos hacia o desde depósitos y cabezales. Esto es de suma importancia cuando se considera una posible autonomía acotada en el caso de BEBs.

- a) Cabezal lejano al depósito y que circulara por sectores diferentes de la ciudad

Para dichas rutas la tasa de consumo fue recalculada utilizando la tasa de consumo de la Ruta 1, que circula por la Pirámide. La tasa de consumo de la Ruta 1 fue ponderada por la distancia entre el cabezal y el depósito, para cada una de las rutas. La razón se debe a que el trayecto de la Ruta 1 en servicio es la ruta que termina más próxima al depósito y al estar en servicio posee información del GPS (2018), que fue utilizada para estimar su consumo. La segunda razón es que el trayecto cabezal-depósito posee una pendiente importante en la zona llamada la Pirámide, que es un factor decisivo en los consumos de energía de los vehículos.

- b) Cabezal lejano al depósito y que circulara por sectores de la ciudad similares

Se asumió una tasa de consumo igual en el trayecto cabezal-depósito, obtenida a partir de la modelación de la ruta.

- c) Cabezal cerca al depósito

Se asumió una tasa de consumo igual a las anteriores, y obtenida a partir de la modelación de la ruta.

## ANÁLISIS DE DATOS DE BUSES GEORREFERENCIADOS

La Figura 2 muestra el proceso seguido para la creación de los perfiles de velocidad a partir de datos del GPS obtenidos en operación. A continuación se describen los diferentes pasos:

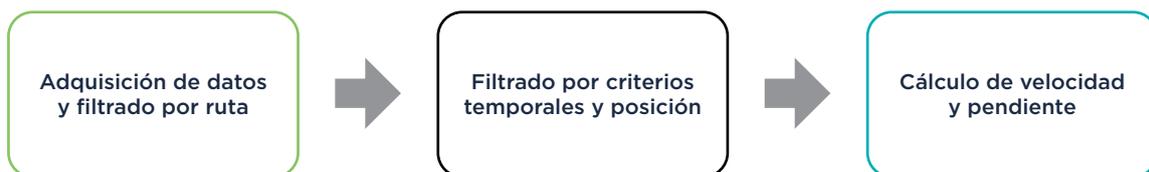
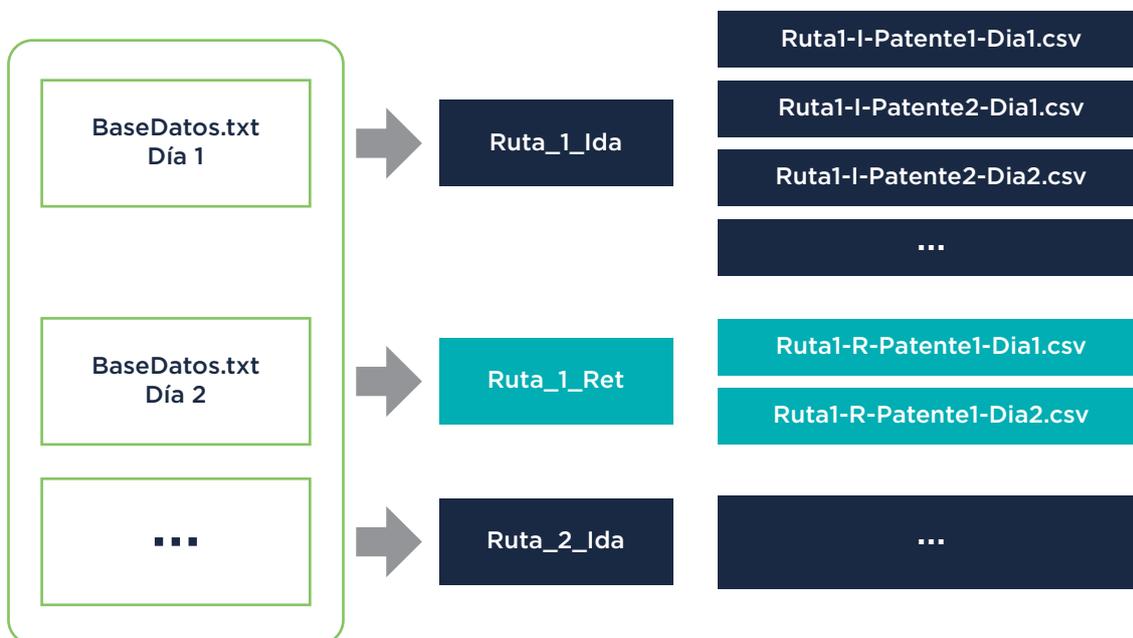


Figura 2. Resumen del proceso para la construcción de los perfiles de velocidad.

## ADQUISICIÓN DE DATOS Y FILTRADO POR RUTA

La base de datos de buses en operación fue facilitada por el DTPM. Esta incluye datos del GPS (posición, velocidad y tiempo) así como identificación de buses (placa patente) y rutas transitadas por cada bus. La base de datos cubre trayectos realizados entre los días 4 y 11 de agosto del 2018.



**Figura 3.** Esquema del primer filtro y ordenamiento de los datos a partir del algoritmo diseñado en Python.

Se desarrolló un algoritmo en Python para filtrar la base de datos, con la finalidad de discriminar por bus, número de ruta, sentido del trayecto (ida o retorno), y el día de la semana en que se realizó cada trayecto.

La Figura 3 esquematiza este primer algoritmo. La primera columna corresponde a los archivos *.txt*. La segunda columna corresponde a las carpetas nombradas según la ruta y sentido del trayecto. La tercera columna corresponde a archivos tipo *.csv* separados por bus, ruta, sentido y día.

A partir de las posiciones del GPS y un mapa de altitudes de Santiago, se calcularon también las altitudes, posiciones cartesianas y se filtraron aquellos datos que estaban fuera de este mapa. Para la transformación a coordenadas cartesianas, se utilizó como elipsoide de referencia el modelo WGS 84, con las fórmulas habituales para la transformación a coordenadas cartesianas.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Ligas, Marcin y Banasik, Piotr, Conversion between Cartesian and geodetic coordinates on a rotational ellipsoid by solving a system of nonlinear equations, *Geodesy and Cartography* 60 (2011): 145-159, doi:10.2478/v10277-012-0013-x.

## FILTRADO POR CRITERIOS TEMPORALES Y POSICIÓN

### FILTROS TEMPORALES

Una vez obtenidos los archivos .csv mencionados anteriormente, se notó lo siguiente:

- La frecuencia de los datos oscilaba entre 1/30 y 1/70 Hz (ver Figura 4), de lo cual no es una óptima resolución para perfiles de rapidez, cuya frecuencia idealmente es de 1 Hz.
- Frecuencias de 1/500 Hz o mayores. Estos grupos de datos fueron desechados.
- Saltos temporales mayores a 100 s. Se seleccionaron grupos de datos entre un salto y otro, cuyo tiempo total fuese mayor de 12 minutos.

Con los datos que fueron conservados, se calculó con cada bus el tiempo de viaje promedio de las distintas rutas.

### FILTRO DE POSICIONES

Se filtraron datos que no tenían relación con la operación del bus en ruta y aquellos que presentaban saltos del GPS. Estos últimos datos se caracterizaban por estar demasiado alejados de los demás puntos.

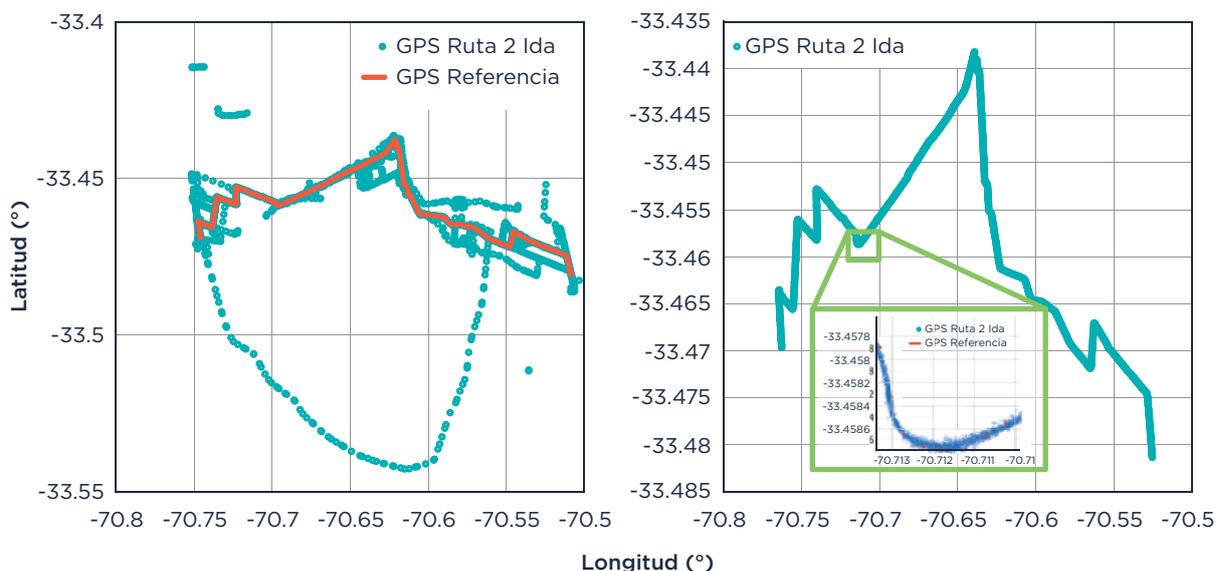
Se utilizaron los *recorridos de referencia georreferenciados* por cada ruta, con una resolución de 50 m aprox. de distancia entre cada nodo, obtenidos con ayuda de la herramienta libre QGIS<sup>6</sup> y un mapa descargado del sitio oficial del DTPM.

Las posiciones fueron filtradas a partir de las posiciones GPS de referencia, el algoritmo formó un rectángulo con los puntos de referencia y seleccionó aquellas posiciones GPS de los datos, que estaban en el interior de esta geometría. En la Figura 5 se presenta como ejemplo la aplicación del algoritmo de filtrado de posición a los datos del GPS del recorrido de la Ruta 2.

Las posiciones fuera de la geometría se presumen que deben ser movimientos del bus relacionado a la reubicación de buses en sus puntos de salidas, traslados de buses entre depósitos o traslados para mantención, entre otros. La gráfica de la derecha corresponde a las posiciones GPS ya filtradas. En el cuadro inferior se observa la finalidad del algoritmo; a partir de las posiciones

<sup>6</sup> QGIS. *Software de código abierto para Sistema de Información Geográfica*. <https://www.qgis.org/>.

GPS de referencia, se tomaron aquellas posiciones GPS que están dentro de estas posiciones de referencia.



**Figura 4.** Ejemplo del filtrado para Ruta 2 ida. En la gráfica izquierda, las posiciones encerradas en un círculo corresponden a saltos del GPS por pérdida de señal, mientras que la línea roja corresponde a la ruta propiamente tal.

## PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE CICLOS DE CONDUCCIÓN REPRESENTATIVOS POR RECORRIDOS CON INFORMACIÓN DE GPS

### CÁLCULO DE VELOCIDAD Y PENDIENTE

La información de posición de los GPS se repite para todos los buses que recorren una ruta particular, y es esperable que registren las mismas posiciones todos los días, debido que la ruta al recorrer está predeterminada. Por el otro lado, el tiempo de recorrido es una variable mucho más aleatoria que las posiciones y tiende a variar, dependiendo del tráfico, semáforos, modo de conducción, meteorología y tipo de bus.

Se calculó el tiempo promedio por la posición de cada GPS, al combinar los datos de todos los días. Por cada posición se calculó la distancia con respecto a su punto anterior y también la diferencia de tiempo entre ambas posiciones. Finalmente, a partir de las diferencias de tiempo y de distancias, junto con la altitud en cada posición, se obtuvo velocidad y pendiente para cada ruta.

## CÁLCULO DE VELOCIDAD CRUDA

La velocidad fue obtenida mediante la derivada numérica de la distancia recorrida promedio y el tiempo promedio recorrido. Sin embargo, para mejorar el perfil, fue necesario establecer una relación entre el tiempo y la distancia totales de la ruta. Se calcularon dos velocidades, la velocidad con respecto a la distancia:

$$V_{n,dist} = \frac{r_n - r_{n-1}}{(t_n - t_{n-1}) \times w}$$

Y la velocidad con respecto al tiempo:

$$V_{n,time} = \frac{(t_n - t_{n-1}) \times w}{t_n - t_{n-1}}$$

donde  $w$  es una variable peso, calculada mediante:

$$w = R_{prom} \times T_{prom}$$

donde  $R_{prom}$  corresponde a las distancias recorridas promedio total de la ruta, mientras que  $T_{prom}$  es el tiempo promedio que demora en recorrer la ruta.

Finalmente, la velocidad es calculada mediante el promedio armónico de los dos anteriores, disminuyendo los máximos asociados a falta de datos temporales:

$$v = 2 \left( \frac{1}{V_{n,time}} + \frac{1}{V_{n,dist}} \right)^{-1}$$

## OPTIMIZACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD

Al resultado anterior transformado se le realizó un ajuste de curva polinómico, que permite seguir cada punto de la curva lo más fielmente posible. El ajuste daba como resultado frecuencias de tiempo menores a 1 segundo o bien mayores, dependiendo de la calidad de los datos. La transformación para obtener datos de 1 Hz de frecuencia, dependía de esto último.

Para ajustes donde la frecuencia era menor a 1 segundo, los datos fueron promediados mediante técnica del móvil, con el tamaño de la ventana igual al intervalo del tiempo menor a 1 segundo. Mientras que para ajustes donde la frecuencia era mayor a 1 s, la velocidad fue interpolada mediante un polinomio cúbico.

Las curvas además debían cumplir con las siguientes condiciones:

- Los máximos no podían superar los 80 km/h, ya que es la máxima velocidad permitida por los buses del Transantiago.
- La integral numérica de la velocidad con respecto al tiempo debía ser igual o muy próxima a la distancia total recorrida.
- La cantidad de veces que el perfil llegaba a cero o cercano, debía al menos ser igual al número de paradas que tenía la ruta. Acá se supone que el bus parará en todas las paradas que tiene asignada.

Tales condiciones fueron impuestas mediante un último código que optimizó la curva y logró cumplir con las condiciones impuestas para cada ruta. La última condición necesitó de una tercera fuente de datos, que también fue facilitada por el DTPM, y que correspondía a la cantidad de paradas por cada ruta.

## MODELACIÓN DE LA OPERACIÓN DE BEBS

Para las modelaciones se empleó Autonomie,<sup>7</sup> una herramienta avanzada de simulación a partir de las características de vehículos y sus componentes, permitiendo estimar consumos de energía, autonomía y análisis de indicadores de desempeño para distintas configuraciones de un vehículo. Esta herramienta fue desarrollada por el Argonne National Laboratory de la Universidad de Chicago y el U.S. Department of Energy, en colaboración con General Motors.

La herramienta simula el comportamiento de un vehículo operando en una ruta bajo condiciones definidas por el usuario. Para la simulación se debe desarrollar un modelo virtual del vehículo a partir de la configuración de cada uno de sus componentes y sistemas. En el caso de un vehículo eléctrico como este, corresponden, entre otros, al motor, sistema de transmisión, diferenciales, ruedas, neumáticos, controladores, baterías, pesos, dimensiones, y aerodinámica. Posteriormente, se debe configurar el ciclo de conducción en el que se desea evaluar el vehículo, el cual contiene la información de velocidad y pendiente de la ruta, más las condiciones ambientales.

---

<sup>7</sup> Autonomie. Software para el modelado de ciclos y vehículos. <https://www.autonomie.net/>.

La metodología general para la modelación de consumos de energía se presenta en la siguiente figura:



Figura 5. Metodología general para la modelación.

## DESARROLLO DE BUSES VIRTUALES

CMM ha desarrollado, en colaboración con el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), dos modelos virtuales de un bus eléctrico. El primer modelo virtual, Bus A Versión 1, corresponde a la versión del bus que estuvo en demostración en Santiago con baterías de 324 kWh y dos motores de 90 kW de potencia máxima cada uno. Este modelo fue validado a partir de pruebas realizadas con el apoyo del Centro de Desarrollo Tecnológico de Finlandia (VTT) bajo el ciclo de conducción de buses Braunschweig y una prueba desarrollada por el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV) bajo el ciclo Transantiago (TS-STGO).<sup>8</sup>

El segundo modelo virtual, Bus A Versión 2, fue desarrollado a partir de la información técnica de una nueva versión de primer bus, el cual tiene baterías de 277 kWh y dos motores de 150 kW de potencia máxima. En mayo de 2019 el 3CV determinó el consumo de dicho bus bajo los ciclos TS-STGO y Braunschweig en distintas condiciones:

- Gradiente: 0 % y 1,4 %.
- Aire acondicionado: encendido (en inglés: AC on) y apagado (AC off).

En la Tabla 1 se presenta la comparación de los resultados de las pruebas llevadas a cabo en los laboratorios del 3CV de las dos versiones del bus eléctrico A, y los resultados de las modelaciones del bus virtual bajo las mismas condiciones:

- *Carga simulada* =  $(PV + 75) + (NP \times 65) \times 0,5$

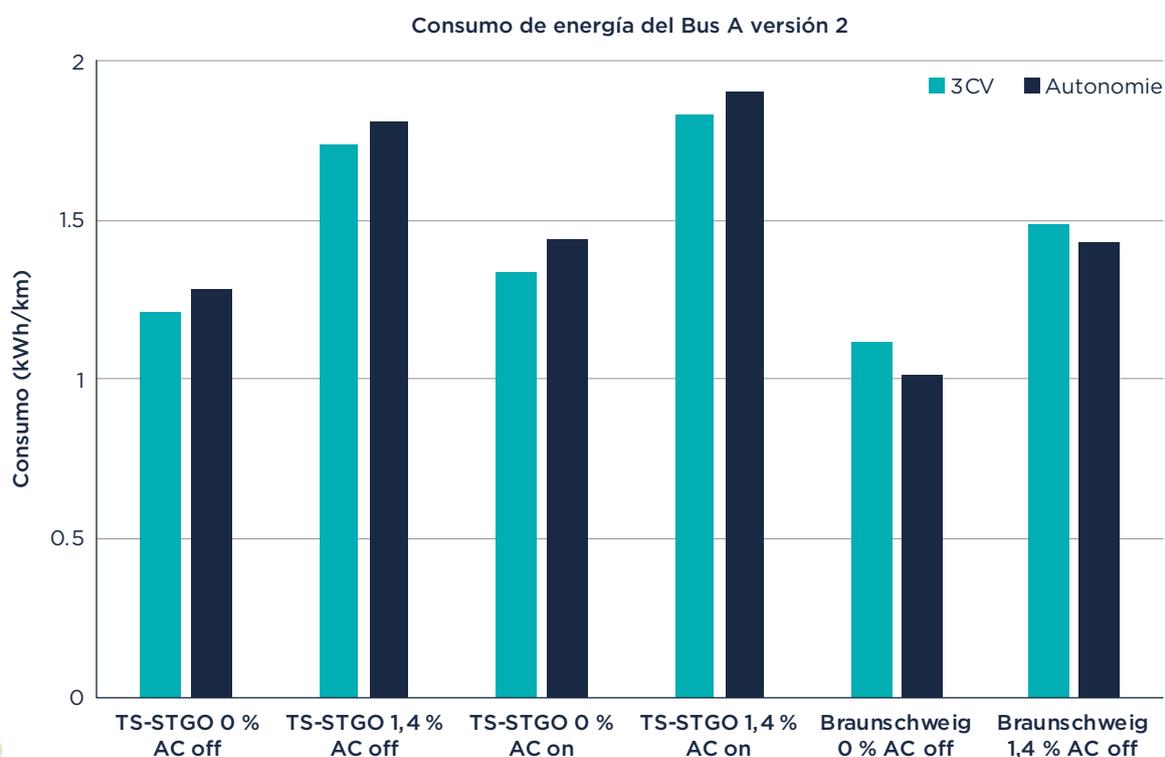
<sup>8</sup> Resolución 2243 exenta.

- PV: Peso en vacío
- NP: Número de pasajeros
- Temperatura ambiente: 19-26°C
- Humedad relativa del aire: 31-52 %

**Tabla 1.** Resultados de consumos de energías de buses eléctricos testeados en el 3CV y modelados con los buses virtuales (versiones 1 y 2).

| Bus                       | PV (kg) | NP | Ciclo de conducción       | Consumo de energía medido Laboratorio 3CV (kWh/km) | Consumo de energía simulado con bus virtual (kWh/km) |
|---------------------------|---------|----|---------------------------|--|--|
| A versión 1. <sup>a</sup> | 13.300  | 68 | TS-STGO 0 % AC off        | 1,45   | 1,32   |
|                           |         |    | TS-STGO 1,4 % AC off      | 2,00   | 1,84   |
| A versión 2. <sup>a</sup> | 12.788  | 81 | TS-STGO 0 % AC off        | 1,21   | 1,28   |
|                           |         |    | TS-STGO 1,4 % AC off      | 1,74   | 1,81   |
|                           |         |    | TS-STGO 0 % AC on         | 1,34   | 1,44   |
|                           |         |    | TS-STGO 1,4 % AC on       | 1,83   | 1,90   |
|                           |         |    | Braunschweig 0 % AC off   | 1,12   | 1,01   |
|                           |         |    | Braunschweig 1,4 % AC off | 1,49   | 1,43   |

Al analizar los resultados de las mediciones realizadas en el dinamómetro de chasis del laboratorio versus los modelados, se obtiene una correlación con R<sup>2</sup> igual a 0,94.



**Figura 6.** Resultados de consumos de energía de la versión 2 del Bus A.

Además, por solicitud de las autoridades, se desarrolló un Bus B con las características de otro vehículo que se encontraba operando en el transporte público de Santiago. Modelando, de esta manera, el Bus A versión 2 y el Bus B. En la Tabla 2 se presentan las características de cada uno de estos.

**Tabla 2.** Características de buses modelados.

| Bus                                 | Bus A (versión 2) | Bus B             |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Tipo de batería                     | LFP               | LFP               |
| Tipo de carga                       | Carga en depósito | Carga en depósito |
| Potencia nominal (kW)               | 110x2             | 215               |
| Potencia máxima (kW)                | 150x2             | 350               |
| Pack de baterías (kWh)              | 277               | 324               |
| Tipo de cargador                    | AC                | DC                |
| Potencia de cargador                | 80                | 150               |
| Tiempo de carga (0 a 100 % SOC) min | 204               | 130               |
| Longitud (m)                        | 12                | 12                |
| Peso bruto vehicular (kg)           | 18.128            | 18.950            |
| Peso en vacío (kg)                  | 12.863            | 13.350            |
| Asientos                            | 30                | 27                |
| Capacidad de pasajeros              | 81                | 87                |

Además de la modelación del consumo de energía de la nueva versión del bus bajo el ciclo TS-STGO, se ha simulado el consumo en el recorrido de la Ruta 2, considerando un 50 y 100 % de carga de pasajeros, con y sin el AC funcionando. Se utilizó este recorrido porque fue uno de los primeros en ser electrificado en la ciudad de Santiago.

**Tabla 3.** Simulación del consumo de energía de la versión 2 del Bus A bajo distintas condiciones de carga en la Ruta 2.

| Bus A versión 2 (50 %)  | Consumo (kWh/km) | Promedio vuelta (kWh/km) |
|-------------------------|------------------|--------------------------|
| Ruta 2 ida (AC off)     | 1,70             | 1,10                     |
| Ruta 2 retorno (AC off) | 0,49             |                          |
| Ruta 2 ida (AC on)      | 1,93             | 1,29                     |
| Ruta 2 retorno (AC on)  | 0,65             |                          |
| Bus B (100 %)           | Consumo (kWh/km) | Promedio vuelta (kWh/km) |
| Ruta 2 ida (AC off)     | 1,94             | 1,26                     |
| Ruta 2 retorno (AC off) | 0,57             |                          |
| Ruta 2 ida (AC on)      | 2,16             | 1,45                     |
| Ruta 2 retorno (AC on)  | 0,73             |                          |

Además, para el desarrollo de distintas condiciones de peso y de consumo de accesorios, se incorporaron los siguientes parámetros en las modelaciones:

- Peso 30 % de carga de pasajeros: 1.560 kg
- Peso 50 % de carga de pasajeros: 2.600 kg
- Peso 100 % de carga de pasajeros : 5.200 kg
- Consumo de accesorios con AC apagado: 2kW
- Consumo de accesorios con AC encendido: 5kW

Finalmente, se evaluaron 3 condiciones:

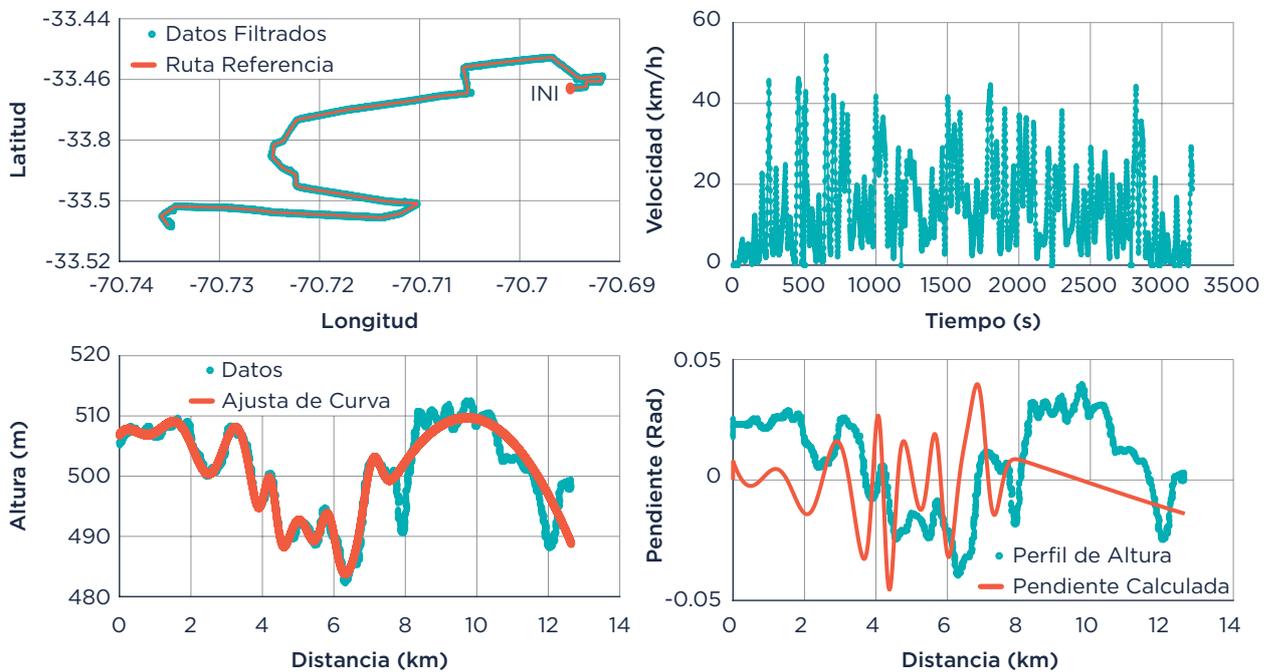
- Peso de 30 % de carga de pasajeros sin AC
- Peso de 50 % de carga de pasajeros con y sin AC
- Peso de 100 % de carga de pasajeros con y sin AC

## RESULTADOS

Los gráficos a continuación presentan un ejemplo de los ciclos de conducción representativos elaborados para cada una de las rutas, con resolución de 1 Hz para su posterior simulación de consumo de energía con el modelo de bus virtual.

### CICLOS DE CONDUCCIÓN REPRESENTATIVOS

Se desarrollaron gráficos con la información de los GPS, elaborando perfiles de velocidad y altura con una resolución de 1 segundo, de 102 de las 145 rutas evaluadas<sup>9</sup> (ida + retorno). A continuación, se presentan los perfiles para la Ruta 3 ida.



**Figura 7.** Perfiles de la Ruta 3 ida.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los principales parámetros del ciclo de conducción desarrollado. Cada uno de los resultados tiene asociado su error (%) debido al cálculo de este, los que en general son menores al 4 %.

<sup>9</sup> 43 rutas no poseían información de sus perfiles de velocidad o ciclos de conducción y fueron reconstruidas. Véase sección de metodología.

**Tabla 4.** Variables de Ruta 3 ida y retorno.

|          | Magnitud  | Distancia recorrida (km) | Tiempo recorrido(s) | Vel. prom (km/h) | Vel. trayecto (km/h) | Pendiente del trayecto (%) |
|----------|-----------|--------------------------|---------------------|------------------|----------------------|----------------------------|
| Ruta 3 I | Resultado | 12,65                    | 3215,0              | 14,2             | 14,2                 | -0,089                     |
|          | Error (%) | 0,06                     | 2,1                 | 0,6              | 0,6                  | 0,063                      |
| Ruta 3 R | Resultado | 10,57                    | 3470,0              | 11,3             | 11,0                 | 0,129                      |
|          | Error (%) | 0,05                     | 4,2                 | 1,2              | 1,3                  | 0,050                      |

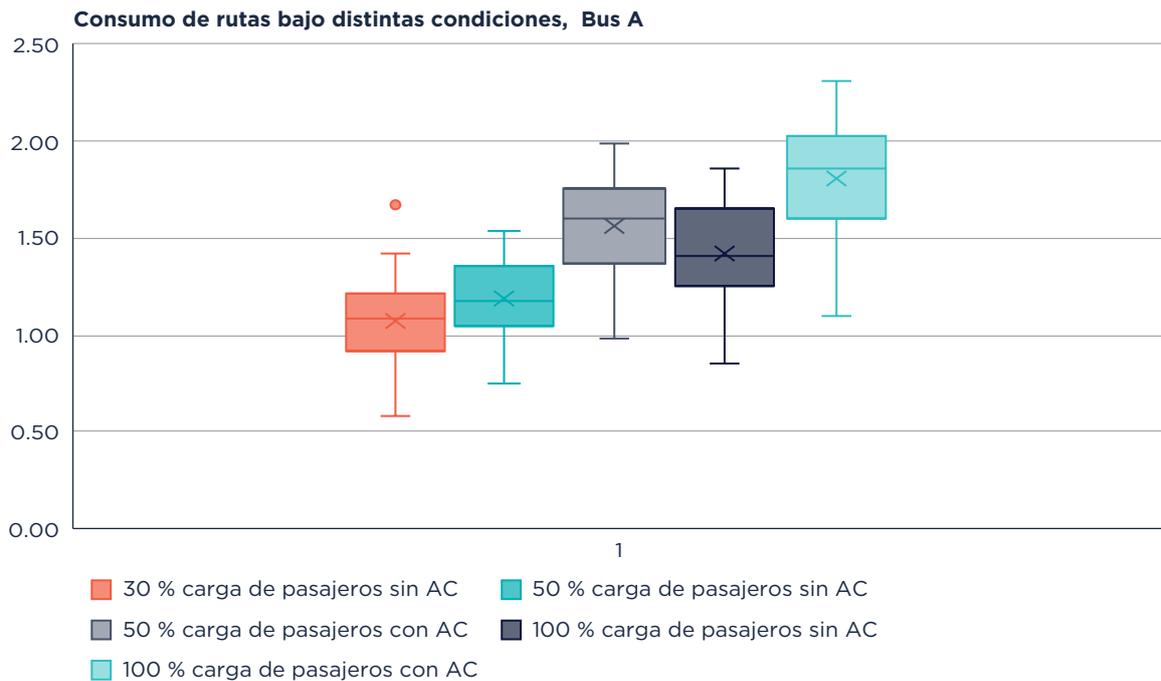
## MODELACIÓN DE BEBS

En el presente estudio se realizaron modelaciones para dos buses eléctricos, Bus A y Bus B, bajo las siguientes condiciones de carga de pasajeros y AC:

- Con 30 % de la carga de pasajeros y AC apagado.
- Con 50 % de la carga de pasajeros y AC apagado.
- Con 50 % de la carga de pasajeros y AC encendido.
- Con 100 % de la carga de pasajeros y AC apagado.
- Con 100 % de la carga de pasajeros y AC encendido.

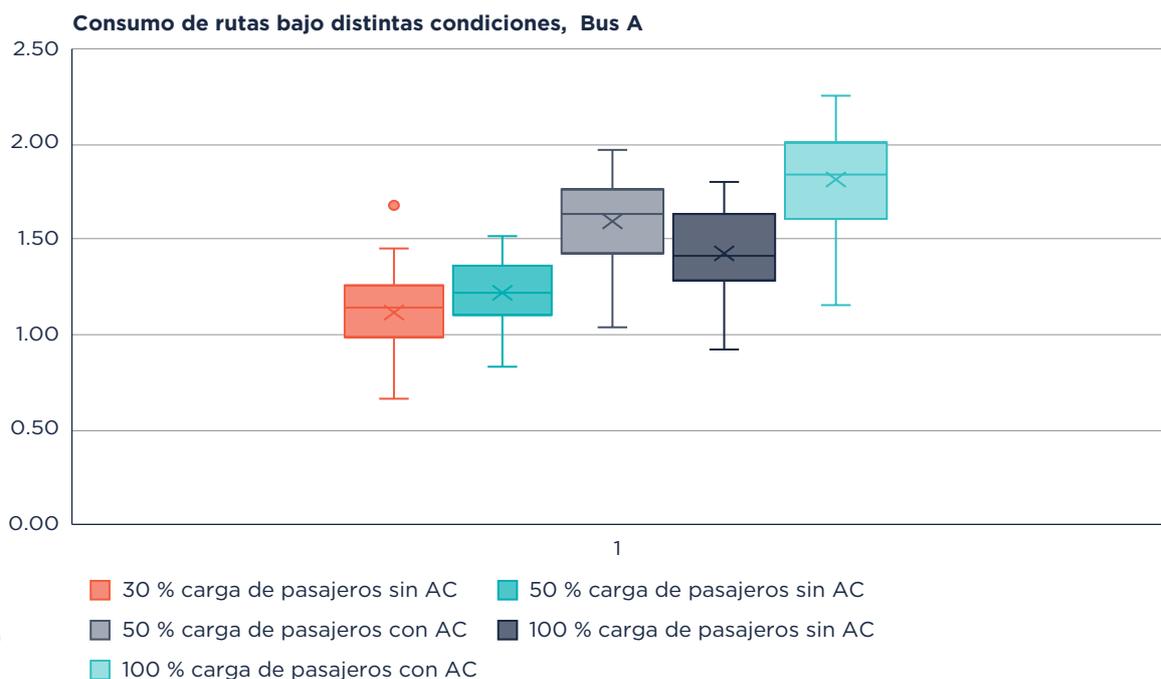
Un total de 84 rutas fueron estudiadas, de las cuales 48 fueron evaluadas bajo las cinco condiciones anteriormente mencionadas. Las restantes 36 fueron analizadas solo bajo la condición de 30 % de carga de pasajeros sin AC debido a una solicitud expresa de la autoridad.

En la Figura 7 se presentan las tasas de consumo (kWh/km) para el Bus A. Se observa una diferencia en los promedios, cercana al 65 % comparando las condiciones extremas. Además, los resultados mínimos y máximos presentan rangos que varían entre 1 y 1,8 kWh/km según la condición de carga de pasajeros y la utilización del AC. Al analizar el desempeño del bus en términos de consumo, en algunas rutas se presentan resultados cercanos a 2,5 kWh/km (100 % de carga de pasajeros con AC) y en otras de alrededor de 0,55 kWh/km (30 % de carga de pasajeros sin AC).



**Figura 8.** Tasa de consumo (kWh/km) del Bus A para cada una de las rutas bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.

En el caso del Bus B (ver Figura 9) se presentan variaciones similares a las observadas en el Bus A. Sin embargo, sus tasas de consumo son levemente superiores, lo que está relacionado con el mayor peso de este bus debido al mayor tamaño de su pack de baterías. En la Tabla 5 se presentan los promedios por cada uno de los casos analizados, donde se observa que el Bus B tiene en promedio un 2 % más de consumo que el Bus A.



**Figura 9.** Tasa de consumo (kWh/km) del Bus B para cada una de las rutas bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.

**Tabla 5.** Promedios de tasa de consumo de los Buses A y B bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.

| Escenario                          | Tasa de consumo (kWh/km) |       |
|------------------------------------|--------------------------|-------|
|                                    | Bus A                    | Bus B |
| 30 % de carga de pasajeros sin AC  | 1,08                     | 1,14  |
| 50 % de carga de pasajeros sin AC  | 1,19                     | 1,22  |
| 50 % de carga de pasajeros con AC  | 1,52                     | 1,56  |
| 100 % de carga de pasajeros sin AC | 1,43                     | 1,44  |
| 100 % de carga de pasajeros con AC | 1,77                     | 1,78  |

En el caso de las condiciones con AC, su utilización aumenta en promedio un 26 % el consumo de energía, mientras que el efecto de doblar el peso de pasajeros es cercano al 17 %. En la Tabla 6 se presentan las diferencias entre cada una de las condiciones evaluadas.

**Tabla 6.** Diferencia de promedios de consumo de energía bajo distintas condiciones. Las celdas muestran incrementos de condición en la vertical respecto de las condiciones en la horizontal.

| 50 % carga de pasajeros sin AC | 50 % carga de pasajeros con AC | 100 % carga de pasajeros sin AC |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 28 %                           |                                |                                 |
| 20 %                           |                                |                                 |
| 47 %                           | 15 %                           | 23 %                            |

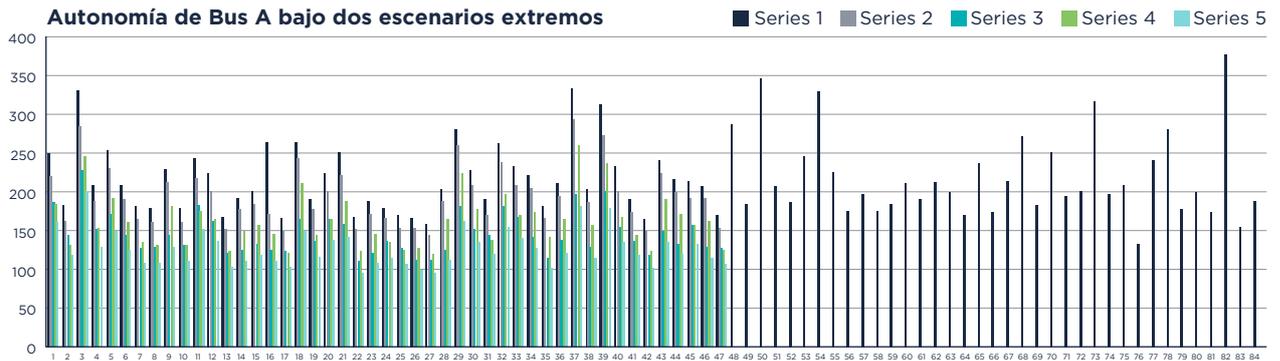
  

|                              |
|------------------------------|
| Efecto AC                    |
| Efecto doblar el peso        |
| Efecto AC más doblar el peso |

## CÁLCULO DE INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO (KPIs)

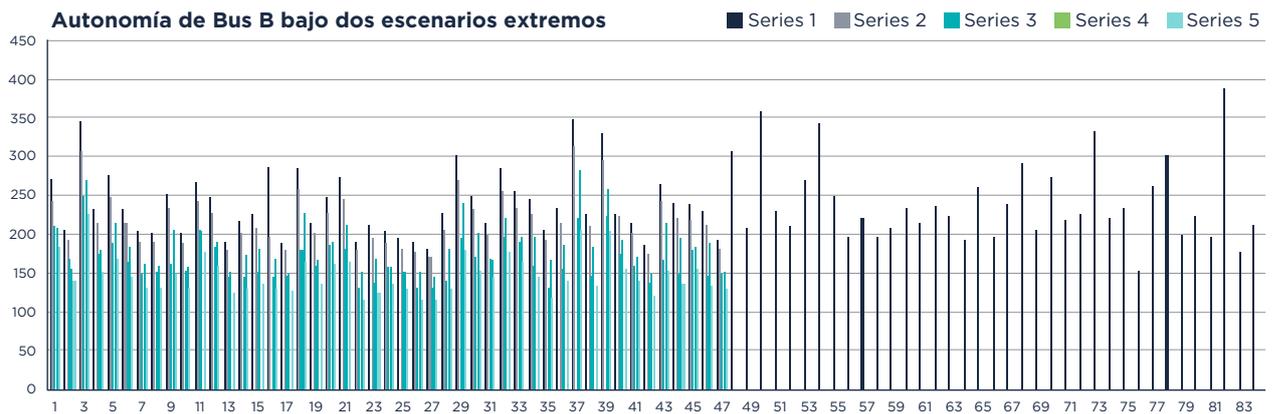
### AUTONOMÍA

Se calcularon las autonomías (km) de las rutas considerando la capacidad de las baterías de los buses: 277kWh y 324 kWh, asumiendo que las baterías comienzan con un 100 % de estado de carga y se operan hasta un 20 % de estado de carga.



**Figura 10.** Autonomías por carga del Bus A bajo dos condiciones extremas: 30 % de carga de pasajeros sin AC funcionando y 100 % de carga de pasajeros con el AC funcionando.

En las Figuras 11 y 12 se presenta la información de las autonomías de los dos buses en cada una de las rutas. Para algunas de ellas se observan autonomías bajo los escenarios de 30 % de carga de pasajeros sin AC (mejor escenario), y 100 % de carga de pasajeros y con el AC funcionando (peor escenario). En los anexos se puede encontrar el detalle de cada una de las rutas.



**Figura 11.** Autonomías por carga del Bus B bajo dos condiciones extremas: 30 % de carga de pasajeros sin AC funcionando y 100 % de carga de pasajeros con el AC funcionando.

Tal como se observa en las Tablas 7 y 8, en promedio la autonomía de un Bus bajo la condición de 30 % de carga de pasajeros y sin AC, es cercana a 215 km (Bus A) versus 130 km que se presentan bajo la condición más extrema. Es decir, la autonomía disminuye en promedio un 65 % al aumentar la carga a 100 % y al utilizar AC. Finalmente, al observar los dos vehículos modelados, el Bus B tiene en promedio de un 14 % más de autonomía que el Bus A en las rutas modeladas. Este es un resultado que guarda relación a la mayor capacidad de las baterías, y que favorece la autonomía del Bus A. Sin embargo, esta mayor capacidad también significa más peso, lo que incrementa marginalmente el consumo de energía por kilómetro, tal como se observa anteriormente en la Tabla 5.

**Tabla 7.** Promedios de autonomías por carga de los Buses A y B bajo cinco condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de AC.

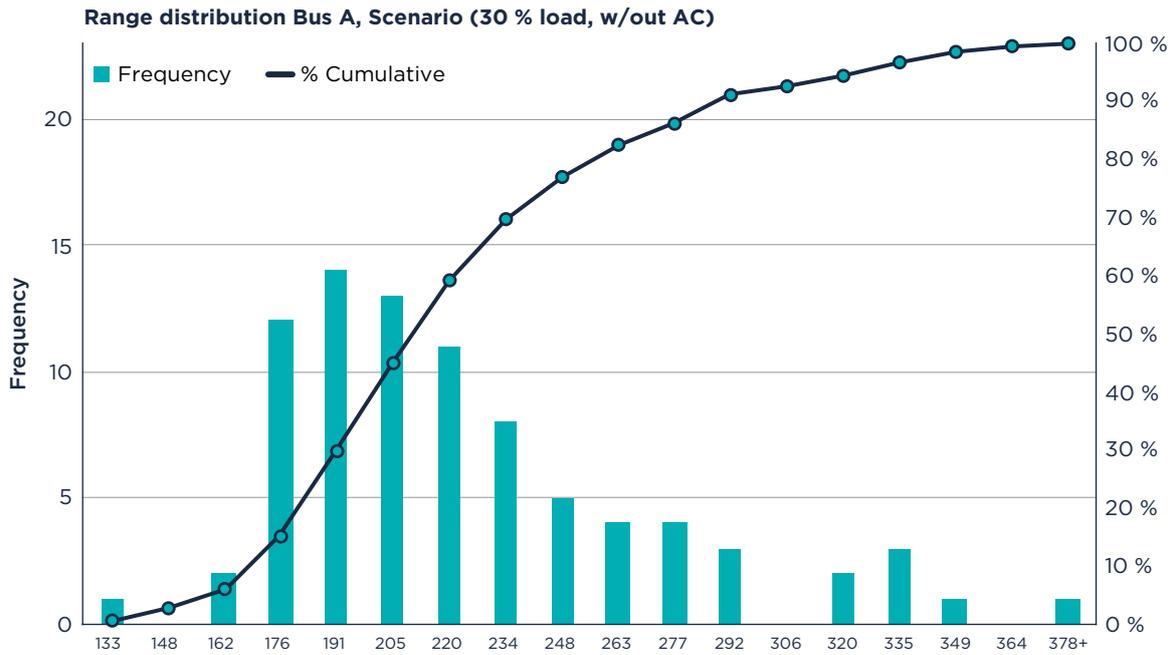
| Escenario                          | Autonomía Promedio (km) |       | Diferencia |
|------------------------------------|-------------------------|-------|------------|
|                                    | Bus A                   | Bus B |            |
| 30 % de carga de pasajeros sin AC  | 215                     | 236   | 10 %       |
| 50 % de carga de pasajeros sin AC  | 194                     | 218   | 12 %       |
| 50 % de carga de pasajeros con AC  | 150                     | 170   | 13 %       |
| 100 % de carga de pasajeros sin AC | 161                     | 185   | 15 %       |
| 100 % de carga de pasajeros con AC | 130                     | 149   | 15 %       |

**Tabla 8.** Diferencia de promedios de autonomía bajo distintas condiciones.

| 50 % carga de pasajeros con AC | 100 % carga de pasajeros sin AC | 100 % carga de pasajeros con AC |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 29 %                           | 19 %                            | 48 %                            |
|                                |                                 | 15 %                            |
|                                |                                 | 24 %                            |

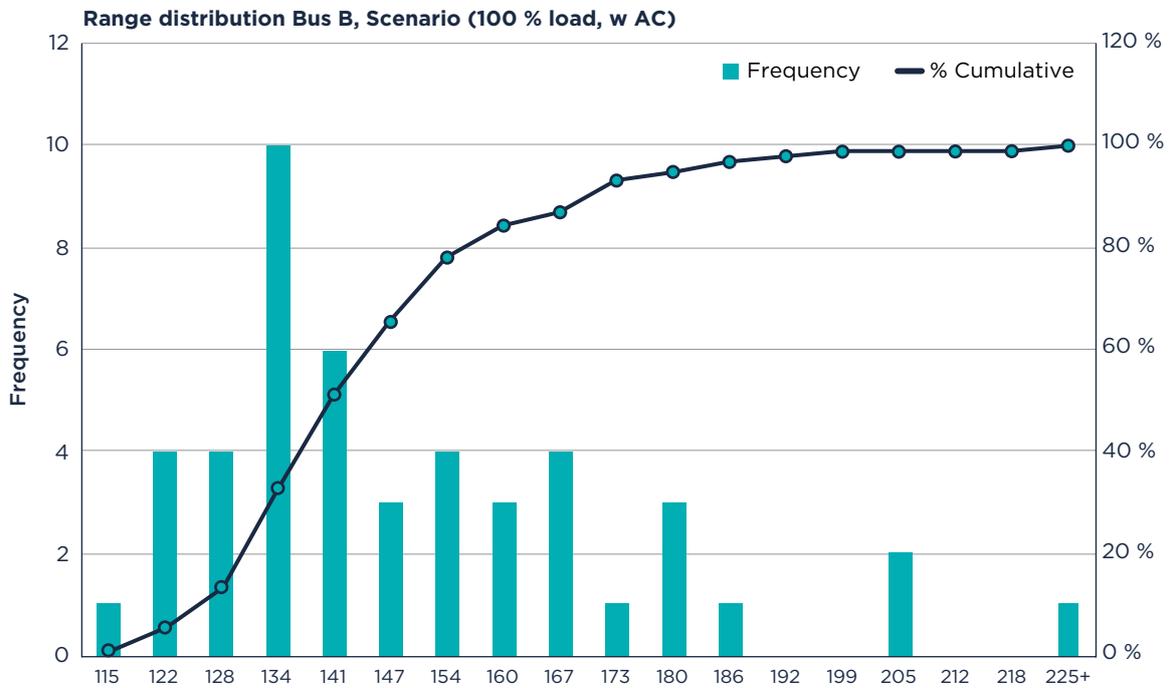
|                              |
|------------------------------|
| Efecto AC                    |
| Efecto doblar el peso        |
| Efecto AC más doblar el peso |

Teniendo en consideración que el promedio distancia recorrida por los buses en Santiago es de 200 km al día, y solo observando la condición con mayores autonomías (es decir, con un 30 % de carga de pasajeros, sin AC y con el Bus A), cerca de un 40 % de las rutas analizadas tendrían una autonomía sobre 250 km y un 85 % sobre los 200 km.



**Figura 12.** Distribución de autonomías (km/carga) en el escenario menos exigente: 30 % carga de pasajeros sin AC.

Por otro lado, si analizamos la distribución del escenario con menores autonomías (o un 100 % de carga con AC y Bus A versión 2), el resultado es totalmente distinto: solo un 1 % de las rutas podrían circular a más de 250 km y 2 % sobre los 200 km. Para este escenario, el 85 % de las rutas tendría una autonomía menor a 160 km.



**Figura 13.** Distribución de autonomías (km/carga) en el escenario más exigente: 100 % carga de pasajeros AC.

## CONCLUSIONES

El consumo energético de los buses en un sistema de transporte público con tecnología eléctrica de baterías es un aspecto clave a analizar, tanto por su relación con la operación, como por sus consecuencias en la viabilidad financiera del sistema. Con una buena planificación, los BEBs pueden tener una operación equivalente a los buses diésel, aportando una reducción de los costos de operación que en el largo plazo permite reducir los costos totales del sistema. Por esta razón, este estudio ha sido un insumo muy importante para la Secretaría Técnica del DTPM en el diseño de los procesos de licitación iniciados a partir de 2019, y en particular de la licitación de suministradores de flota<sup>10</sup> y de la preparación de las bases técnicas de operadores que se licitarán a continuación.

Para los buses de propulsión eléctrica, el consumo de energía es muy importante para la planificación del despliegue exitoso de flotas de buses con esta nueva tecnología. Por ejemplo, la autonomía de los buses debe ser suficiente para garantizar la correcta operación del sistema. Además de la autonomía, una correcta estimación de los consumos energéticos permite prever la demanda de energía eléctrica que tendrán los sistemas de recarga de los buses, facilitando la evaluación de las condiciones de los sitios a emplear como depósitos de buses y de las redes eléctricas en distintas zonas de la ciudad. Este reporte evalúa, mediante simulación computacional, distintos escenarios de consumo energético de buses eléctricos, teniendo en cuenta diferentes niveles de carga de pasajeros y de utilización de accesorios de los vehículos.

Bajo los escenarios analizados, se encontró que el uso del AC tiene un efecto importante en la autonomía, disminuyéndola en promedio un 21 %. La carga de pasajeros también influye en la autonomía (por ejemplo, duplicar la carga de pasajeros disminuye la autonomía 17 % en promedio). En este sentido, la autonomía de los buses analizados puede variar hasta en 150 km dependiendo de la cantidad de pasajeros que esté llevando y del uso de accesorios como el AC.

Los indicadores de desempeño en distintas rutas deben ser consideradas al momento de planificar la introducción de esta nueva tecnología, seleccionando las rutas más apropiadas para buses eléctricos de baterías, reduciendo los

<sup>10</sup> DTPM. *Servicio Complementario de suministro de buses para el Sistema de Transporte Público Metropolitano.*



riesgos de afectar los indicadores claves de operación, como disponibilidad, frecuencia y/o regularidad, y sin requerir un incremento significativo de la flota respecto del escenario base con buses diésel.

Finalmente, se debe tener en consideración que las modelaciones presentadas corresponden a buses nuevos. Es decir, que las capacidades de sus baterías corresponden a la capacidad nominal, condición que se va degradando al pasar el tiempo. Por esta razón se ha recomendado una metodología para que los proveedores de buses presenten su información sobre consumos de energía y autonomías bajo condiciones objetivas y comparables, que representen la operación en Santiago<sup>11</sup>. Como complemento, se propone limitar el deterioro máximo de la autonomía en un 20 % del desempeño original, exigiendo que su desempeño esté cubierto por las garantías del fabricante, recomendándose además cómo se puede efectuar un seguimiento de esta exigencia.

---

<sup>11</sup> Resolución 2243 exenta.

## ANEXO 1: CONSUMOS DE BUSES A Y B

| Ruta | BUS A                                     |                |                |                 |                 | BUS B                                     |                |                |                 |                 |
|------|---|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | Consumo (kWh/km) con % carga de pasajeros |                |                |                 |                 | Consumo (kWh/km) con % carga de pasajeros |                |                |                 |                 |
|      | 30 %<br>sin AC                            | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC | 30 %<br>sin AC                            | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC |
| 1    | 0.89                                      | 1.01           | 1.18           | 1.20            | 1.38            | 0.95                                      | 1.07           | 1.23           | 1.25            | 1.41            |
| 2    | 1.21                                      | 1.37           | 1.54           | 1.69            | 1.87            | 1.26                                      | 1.35           | 1.53           | 1.67            | 1.85            |
| 3    | 0.67                                      | 0.78           | 0.98           | 0.90            | 1.10            | 0.75                                      | 0.85           | 1.04           | 0.96            | 1.15            |
| 4    | 1.06                                      | 1.18           | 1.46           | 1.44            | 1.72            | 1.11                                      | 1.21           | 1.49           | 1.45            | 1.73            |
| 5    | 0.88                                      | 0.96           | 1.29           | 1.15            | 1.48            | 0.94                                      | 1.05           | 1.38           | 1.22            | 1.55            |
| 6    | 1.06                                      | 1.16           | 1.54           | 1.39            | 1.77            | 1.11                                      | 1.21           | 1.59           | 1.41            | 1.79            |
| 7    | 1.23                                      | 1.35           | 1.74           | 1.65            | 2.03            | 1.27                                      | 1.36           | 1.74           | 1.61            | 2.00            |
| 8    | 1.24                                      | 1.38           | 1.72           | 1.68            | 2.03            | 1.29                                      | 1.37           | 1.71           | 1.63            | 1.98            |
| 9    | 0.97                                      | 1.04           | 1.53           | 1.22            | 1.71            | 1.03                                      | 1.11           | 1.60           | 1.27            | 1.75            |
| 10   | 1.24                                      | 1.38           | 1.70           | 1.68            | 2.01            | 1.29                                      | 1.38           | 1.70           | 1.65            | 1.97            |
| 11   | 0.91                                      | 1.02           | 1.21           | 1.27            | 1.46            | 0.97                                      | 1.07           | 1.26           | 1.28            | 1.47            |
| 12   | 0.99                                      | 1.10           | 1.37           | 1.35            | 1.62            | 1.05                                      | 1.14           | 1.41           | 1.36            | 1.63            |
| 13   | 1.32                                      | 1.47           | 1.82           | 1.78            | 2.13            | 1.36                                      | 1.45           | 1.80           | 1.73            | 2.08            |
| 14   | 1.15                                      | 1.26           | 1.77           | 1.49            | 2.01            | 1.20                                      | 1.29           | 1.81           | 1.50            | 2.02            |
| 15   | 1.10                                      | 1.20           | 1.67           | 1.42            | 1.89            | 1.16                                      | 1.25           | 1.72           | 1.43            | 1.90            |
| 16   | 0.84                                      | 1.29           | 1.76           | 1.53            | 2.00            | 0.91                                      | 1.32           | 1.80           | 1.54            | 2.01            |
| 17   | 1.33                                      | 1.48           | 1.79           | 1.81            | 2.13            | 1.37                                      | 1.45           | 1.77           | 1.74            | 2.06            |
| 18   | 0.84                                      | 0.91           | 1.35           | 1.05            | 1.49            | 0.91                                      | 1.01           | 1.45           | 1.14            | 1.58            |
| 19   | 1.16                                      | 1.25           | 1.61           | 1.53            | 1.90            | 1.21                                      | 1.29           | 1.64           | 1.56            | 1.90            |
| 20   | 0.99                                      | 1.10           | 1.36           | 1.35            | 1.60            | 1.05                                      | 1.14           | 1.40           | 1.36            | 1.61            |
| 21   | 0.88                                      | 1.00           | 1.39           | 1.17            | 1.57            | 0.95                                      | 1.06           | 1.43           | 1.22            | 1.59            |
| 22   | 1.32                                      | 1.47           | 1.99           | 1.78            | 2.31            | 1.36                                      | 1.44           | 1.96           | 1.73            | 2.25            |
| 23   | 1.18                                      | 1.28           | 1.83           | 1.51            | 2.05            | 1.23                                      | 1.34           | 1.88           | 1.55            | 2.09            |
| 24   | 1.23                                      | 1.34           | 1.63           | 1.64            | 1.92            | 1.28                                      | 1.38           | 1.65           | 1.66            | 1.93            |
| 25   | 1.30                                      | 1.45           | 1.73           | 1.77            | 2.06            | 1.34                                      | 1.43           | 1.71           | 1.73            | 2.01            |
| 26   | 1.33                                      | 1.45           | 1.97           | 1.73            | 2.24            | 1.37                                      | 1.46           | 1.97           | 1.73            | 2.24            |
| 27   | 1.40                                      | 1.54           | 1.98           | 1.86            | 2.31            | 1.44                                      | 1.52           | 1.97           | 1.80            | 2.25            |
| 28   | 1.09                                      | 1.17           | 1.78           | 1.35            | 1.96            | 1.14                                      | 1.26           | 1.87           | 1.42            | 2.03            |
| 29   | 0.79                                      | 0.85           | 1.22           | 0.99            | 1.36            | 0.86                                      | 0.96           | 1.33           | 1.08            | 1.45            |
| 30   | 0.98                                      | 1.06           | 1.46           | 1.25            | 1.65            | 1.04                                      | 1.12           | 1.52           | 1.29            | 1.69            |
| 31   | 1.16                                      | 1.30           | 1.53           | 1.61            | 1.84            | 1.21                                      | 1.30           | 1.53           | 1.57            | 1.81            |
| 32   | 0.84                                      | 0.93           | 1.23           | 1.12            | 1.42            | 0.91                                      | 1.01           | 1.32           | 1.17            | 1.47            |
| 33   | 0.95                                      | 1.06           | 1.32           | 1.31            | 1.57            | 1.02                                      | 1.11           | 1.37           | 1.31            | 1.58            |
| 34   | 1.00                                      | 1.08           | 1.56           | 1.27            | 1.75            | 1.06                                      | 1.16           | 1.64           | 1.31            | 1.80            |
| 35   | 1.22                                      | 1.33           | 1.95           | 1.57            | 2.19            | 1.27                                      | 1.35           | 1.98           | 1.56            | 2.18            |
| 36   | 1.05                                      | 1.15           | 1.60           | 1.35            | 1.81            | 1.11                                      | 1.21           | 1.66           | 1.39            | 1.85            |

| Ruta | BUS A                                     |                |                |                 |                 | BUS B                                     |                |                |                 |                 |
|------|---|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | Consumo (kWh/km) con % carga de pasajeros |                |                |                 |                 | Consumo (kWh/km) con % carga de pasajeros |                |                |                 |                 |
|      | 30 %<br>sin AC                            | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC | 30 %<br>sin AC                            | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC |
| 37   | 0.66                                      | 0.75           | 1.12           | 0.85            | 1.22            | 0.74                                      | 0.83           | 1.18           | 0.92            | 1.27            |
| 38   | 1.09                                      | 1.19           | 1.71           | 1.41            | 1.93            | 1.15                                      | 1.24           | 1.76           | 1.42            | 1.95            |
| 39   | 0.71                                      | 0.81           | 1.10           | 0.94            | 1.23            | 0.78                                      | 0.88           | 1.16           | 1.00            | 1.28            |
| 40   | 0.95                                      | 1.10           | 1.43           | 1.32            | 1.65            | 1.16                                      | 1.16           | 1.49           | 1.35            | 1.68            |
| 41   | 1.16                                      | 1.27           | 1.62           | 1.54            | 1.89            | 1.21                                      | 1.29           | 1.63           | 1.52            | 1.86            |
| 42   | 1.35                                      | 1.49           | 1.87           | 1.79            | 2.18            | 1.39                                      | 1.49           | 1.87           | 1.76            | 2.14            |
| 43   | 0.92                                      | 0.99           | 1.48           | 1.16            | 1.65            | 0.98                                      | 1.07           | 1.56           | 1.21            | 1.71            |
| 44   | 1.02                                      | 1.11           | 1.68           | 1.29            | 1.86            | 1.08                                      | 1.18           | 1.75           | 1.33            | 1.91            |
| 45   | 1.03                                      | 1.15           | 1.42           | 1.41            | 1.68            | 1.09                                      | 1.19           | 1.45           | 1.41            | 1.68            |
| 46   | 1.07                                      | 1.16           | 1.72           | 1.36            | 1.92            | 1.13                                      | 1.22           | 1.78           | 1.38            | 1.95            |
| 47   | 1.31                                      | 1.45           | 1.75           | 1.77            | 2.07            | 1.35                                      | 1.44           | 1.74           | 1.72            | 2.02            |
| 48   | 0.77                                      |                |                |                 |                 | 0.85                                      |                |                |                 |                 |
| 49   | 1.20                                      |                |                |                 |                 | 1.24                                      |                |                |                 |                 |
| 50   | 0.64                                      |                |                |                 |                 | 0.72                                      |                |                |                 |                 |
| 51   | 1.07                                      |                |                |                 |                 | 1.13                                      |                |                |                 |                 |
| 52   | 1.19                                      |                |                |                 |                 | 1.24                                      |                |                |                 |                 |
| 53   | 0.90                                      |                |                |                 |                 | 0.97                                      |                |                |                 |                 |
| 54   | 0.67                                      |                |                |                 |                 | 0.75                                      |                |                |                 |                 |
| 55   | 0.98                                      |                |                |                 |                 | 1.04                                      |                |                |                 |                 |
| 56   | 1.27                                      |                |                |                 |                 | 1.31                                      |                |                |                 |                 |
| 57   | 1.12                                      |                |                |                 |                 | 1.18                                      |                |                |                 |                 |
| 58   | 1.27                                      |                |                |                 |                 | 1.31                                      |                |                |                 |                 |
| 59   | 1.20                                      |                |                |                 |                 | 1.25                                      |                |                |                 |                 |
| 60   | 1.05                                      |                |                |                 |                 | 1.11                                      |                |                |                 |                 |
| 61   | 1.16                                      |                |                |                 |                 | 1.21                                      |                |                |                 |                 |
| 62   | 1.04                                      |                |                |                 |                 | 1.10                                      |                |                |                 |                 |
| 63   | 1.11                                      |                |                |                 |                 | 1.16                                      |                |                |                 |                 |
| 64   | 1.31                                      |                |                |                 |                 | 1.35                                      |                |                |                 |                 |
| 65   | 0.93                                      |                |                |                 |                 | 1.00                                      |                |                |                 |                 |
| 66   | 1.28                                      |                |                |                 |                 | 1.32                                      |                |                |                 |                 |
| 67   | 1.03                                      |                |                |                 |                 | 1.09                                      |                |                |                 |                 |
| 68   | 0.82                                      |                |                |                 |                 | 0.89                                      |                |                |                 |                 |
| 69   | 1.21                                      |                |                |                 |                 | 1.26                                      |                |                |                 |                 |
| 70   | 0.88                                      |                |                |                 |                 | 0.95                                      |                |                |                 |                 |
| 71   | 1.14                                      |                |                |                 |                 | 1.19                                      |                |                |                 |                 |
| 72   | 1.10                                      |                |                |                 |                 | 1.15                                      |                |                |                 |                 |
| 73   | 0.70                                      |                |                |                 |                 | 0.78                                      |                |                |                 |                 |
| 74   | 1.12                                      |                |                |                 |                 | 1.17                                      |                |                |                 |                 |

| Ruta | BUS A                                     |                |                |                 |                 | BUS B                                     |                |                |                 |                 |
|------|---|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | Consumo (kWh/km) con % carga de pasajeros |                |                |                 |                 | Consumo (kWh/km) con % carga de pasajeros |                |                |                 |                 |
|      | 30 %<br>sin AC                            | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC | 30 %<br>sin AC                            | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC |
| 75   | 1.06                                      |                |                |                 |                 | 1.11                                      |                |                |                 |                 |
| 76   | 1.66                                      |                |                |                 |                 | 1.68                                      |                |                |                 |                 |
| 77   | 0.93                                      |                |                |                 |                 | 0.99                                      |                |                |                 |                 |
| 78   | 0.79                                      |                |                |                 |                 | 0.86                                      |                |                |                 |                 |
| 79   | 1.25                                      |                |                |                 |                 | 1.30                                      |                |                |                 |                 |
| 80   | 1.11                                      |                |                |                 |                 | 1.16                                      |                |                |                 |                 |
| 81   | 1.27                                      |                |                |                 |                 | 1.32                                      |                |                |                 |                 |
| 82   | 0.59                                      |                |                |                 |                 | 0.67                                      |                |                |                 |                 |
| 83   | 1.42                                      |                |                |                 |                 | 1.46                                      |                |                |                 |                 |
| 84   | 1.18                                      |                |                |                 |                 | 1.23                                      |                |                |                 |                 |

## ANEXO 2: AUTONOMÍA DE BUSES A Y B

| Ruta | BUS A                |                |                |                 |                 | BUS B                |                |                |                 |                 |
|------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | Autonomía (km/carga) |                |                |                 |                 | Autonomía (km/carga) |                |                |                 |                 |
|      | 30 %<br>sin AC       | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC | 30 %<br>sin AC       | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC |
| 85   | 250                  | 220            | 187            | 185             | 161             | 272                  | 243            | 210            | 208             | 183             |
| 86   | 183                  | 162            | 144            | 131             | 119             | 206                  | 191            | 169            | 155             | 140             |
| 87   | 332                  | 285            | 227            | 247             | 201             | 347                  | 305            | 250            | 269             | 225             |
| 88   | 210                  | 188            | 152            | 154             | 129             | 233                  | 215            | 174            | 179             | 150             |
| 89   | 253                  | 230            | 172            | 193             | 150             | 275                  | 248            | 188            | 213             | 168             |
| 90   | 210                  | 191            | 144            | 160             | 125             | 233                  | 215            | 163            | 184             | 145             |
| 91   | 181                  | 164            | 128            | 135             | 109             | 204                  | 191            | 149            | 161             | 130             |
| 92   | 178                  | 161            | 129            | 132             | 109             | 201                  | 190            | 151            | 159             | 131             |
| 93   | 230                  | 212            | 145            | 182             | 130             | 252                  | 233            | 162            | 205             | 148             |
| 94   | 178                  | 161            | 130            | 132             | 111             | 201                  | 188            | 152            | 157             | 131             |
| 95   | 244                  | 217            | 183            | 175             | 152             | 266                  | 243            | 206            | 202             | 176             |
| 96   | 224                  | 201            | 162            | 164             | 137             | 246                  | 227            | 184            | 190             | 159             |
| 97   | 167                  | 151            | 122            | 124             | 104             | 190                  | 179            | 144            | 150             | 124             |
| 98   | 193                  | 177            | 125            | 149             | 110             | 216                  | 201            | 143            | 173             | 128             |
| 99   | 201                  | 185            | 133            | 156             | 117             | 224                  | 208            | 151            | 181             | 136             |
| 100  | 264                  | 171            | 126            | 145             | 111             | 285                  | 196            | 144            | 168             | 129             |
| 101  | 166                  | 150            | 123            | 122             | 104             | 189                  | 179            | 147            | 149             | 126             |
| 102  | 264                  | 244            | 165            | 212             | 149             | 285                  | 257            | 179            | 228             | 164             |
| 103  | 191                  | 178            | 137            | 145             | 117             | 214                  | 201            | 158            | 166             | 136             |
| 104  | 224                  | 201            | 163            | 164             | 138             | 247                  | 227            | 185            | 191             | 161             |
| 105  | 251                  | 222            | 159            | 189             | 141             | 272                  | 245            | 181            | 212             | 163             |
| 106  | 168                  | 151            | 111            | 124             | 96              | 190                  | 180            | 132            | 150             | 115             |
| 107  | 188                  | 173            | 121            | 147             | 108             | 211                  | 193            | 138            | 168             | 124             |
| 108  | 180                  | 166            | 136            | 135             | 115             | 203                  | 188            | 157            | 156             | 134             |
| 109  | 171                  | 153            | 128            | 125             | 107             | 194                  | 182            | 151            | 150             | 129             |
| 110  | 167                  | 152            | 113            | 128             | 99              | 190                  | 177            | 131            | 150             | 116             |
| 111  | 158                  | 144            | 112            | 119             | 96              | 180                  | 170            | 132            | 144             | 115             |
| 112  | 203                  | 189            | 125            | 164             | 113             | 226                  | 205            | 139            | 182             | 128             |
| 113  | 281                  | 260            | 182            | 223             | 163             | 301                  | 269            | 195            | 239             | 179             |
| 114  | 227                  | 209            | 152            | 177             | 134             | 249                  | 231            | 171            | 201             | 154             |
| 115  | 191                  | 171            | 145            | 138             | 120             | 214                  | 200            | 169            | 165             | 144             |
| 116  | 263                  | 239            | 180            | 198             | 156             | 284                  | 256            | 197            | 222             | 176             |
| 117  | 233                  | 209            | 167            | 169             | 141             | 255                  | 235            | 189            | 198             | 165             |
| 118  | 221                  | 204            | 142            | 174             | 127             | 244                  | 224            | 158            | 197             | 144             |
| 119  | 182                  | 167            | 114            | 141             | 101             | 205                  | 192            | 131            | 166             | 119             |
| 120  | 210                  | 193            | 138            | 164             | 122             | 234                  | 215            | 156            | 186             | 140             |

| Ruta | BUS A                |                |                |                 |                 | BUS B                |                |                |                 |                 |
|------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | Autonomía (km/carga) |                |                |                 |                 | Autonomía (km/carga) |                |                |                 |                 |
|      | 30 %<br>sin AC       | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC | 30 %<br>sin AC       | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC |
| 121  | 333                  | 294            | 197            | 260             | 181             | 348                  | 313            | 220            | 282             | 204             |
| 122  | 203                  | 186            | 129            | 157             | 115             | 226                  | 210            | 147            | 183             | 133             |
| 123  | 313                  | 274            | 201            | 236             | 180             | 330                  | 294            | 224            | 258             | 203             |
| 124  | 233                  | 201            | 155            | 168             | 134             | 224                  | 223            | 174            | 192             | 154             |
| 125  | 191                  | 174            | 137            | 144             | 117             | 214                  | 201            | 159            | 171             | 139             |
| 126  | 164                  | 149            | 118            | 124             | 102             | 186                  | 174            | 138            | 148             | 121             |
| 127  | 241                  | 223            | 149            | 191             | 134             | 264                  | 243            | 166            | 213             | 152             |
| 128  | 216                  | 200            | 132            | 172             | 119             | 239                  | 220            | 148            | 195             | 136             |
| 129  | 214                  | 193            | 157            | 157             | 132             | 237                  | 219            | 178            | 184             | 155             |
| 130  | 207                  | 191            | 129            | 163             | 115             | 230                  | 213            | 145            | 187             | 133             |
| 131  | 170                  | 153            | 127            | 125             | 107             | 192                  | 180            | 149            | 151             | 128             |
| 132  | 286                  |                |                |                 |                 | 306                  |                |                |                 |                 |
| 133  | 185                  |                |                |                 |                 | 208                  |                |                |                 |                 |
| 134  | 346                  |                |                |                 |                 | 359                  |                |                |                 |                 |
| 135  | 206                  |                |                |                 |                 | 229                  |                |                |                 |                 |
| 136  | 186                  |                |                |                 |                 | 209                  |                |                |                 |                 |
| 137  | 246                  |                |                |                 |                 | 268                  |                |                |                 |                 |
| 138  | 328                  |                |                |                 |                 | 344                  |                |                |                 |                 |
| 139  | 225                  |                |                |                 |                 | 248                  |                |                |                 |                 |
| 140  | 175                  |                |                |                 |                 | 197                  |                |                |                 |                 |
| 141  | 197                  |                |                |                 |                 | 220                  |                |                |                 |                 |
| 142  | 175                  |                |                |                 |                 | 198                  |                |                |                 |                 |
| 143  | 184                  |                |                |                 |                 | 207                  |                |                |                 |                 |
| 144  | 211                  |                |                |                 |                 | 234                  |                |                |                 |                 |
| 145  | 191                  |                |                |                 |                 | 214                  |                |                |                 |                 |
| 146  | 213                  |                |                |                 |                 | 236                  |                |                |                 |                 |
| 147  | 199                  |                |                |                 |                 | 223                  |                |                |                 |                 |
| 148  | 170                  |                |                |                 |                 | 192                  |                |                |                 |                 |
| 149  | 237                  |                |                |                 |                 | 260                  |                |                |                 |                 |
| 150  | 173                  |                |                |                 |                 | 196                  |                |                |                 |                 |
| 151  | 215                  |                |                |                 |                 | 238                  |                |                |                 |                 |
| 152  | 271                  |                |                |                 |                 | 292                  |                |                |                 |                 |
| 153  | 183                  |                |                |                 |                 | 206                  |                |                |                 |                 |
| 154  | 251                  |                |                |                 |                 | 272                  |                |                |                 |                 |
| 155  | 194                  |                |                |                 |                 | 218                  |                |                |                 |                 |
| 156  | 202                  |                |                |                 |                 | 225                  |                |                |                 |                 |
| 157  | 316                  |                |                |                 |                 | 333                  |                |                |                 |                 |
| 158  | 198                  |                |                |                 |                 | 221                  |                |                |                 |                 |

| Ruta | BUS A                |                |                |                 |                 | BUS B                |                |                |                 |                 |
|------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | Autonomía (km/carga) |                |                |                 |                 | Autonomía (km/carga) |                |                |                 |                 |
|      | 30 %<br>sin AC       | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC | 30 %<br>sin AC       | 50 %<br>sin AC | 50 %<br>con AC | 100 %<br>sin AC | 100 %<br>con AC |
| 159  | 210                  |                |                |                 |                 | 233                  |                |                |                 |                 |
| 160  | 133                  |                |                |                 |                 | 154                  |                |                |                 |                 |
| 161  | 240                  |                |                |                 |                 | 262                  |                |                |                 |                 |
| 162  | 281                  |                |                |                 |                 | 301                  |                |                |                 |                 |
| 163  | 177                  |                |                |                 |                 | 200                  |                |                |                 |                 |
| 164  | 200                  |                |                |                 |                 | 223                  |                |                |                 |                 |
| 165  | 174                  |                |                |                 |                 | 197                  |                |                |                 |                 |
| 166  | 378                  |                |                |                 |                 | 386                  |                |                |                 |                 |
| 167  | 156                  |                |                |                 |                 | 178                  |                |                |                 |                 |
| 168  | 188                  |                |                |                 |                 | 211                  |                |                |                 |                 |

## CONTACTO

zebra@theicct.org  
zebra@c40.org



SUPPORTING PARTNER



FUNDING AGENCY



IMPLEMENTING PARTNERS