




Simulación de la operación de un bus eléctrico de 18 metros en rutas de Santiago de Chile



Agradecimientos: El presente reporte fue desarrollado bajo la 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*).

Este fue elaborado por Marcela Castillo, Ariel Núñez y Sebastián Galarza del Centro de Movilidad Sostenible (CMS), Oscar Delgado y Carlos Bueno del ICCT y con la colaboración del personal técnico de la DTPM.





TABLA DE CONTENIDO

Introducción	2
Características de las rutas operadas con el bus eléctrico	2
Análisis de datos medidos en el pilotaje del bus	4
Modelación virtual del bus eléctrico	5
Resultados	12

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. 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. Entre 2023 y 2024, la cantidad de buses eléctricos ha incrementado de forma dramática, llegando a 2.480 unidades.

Aunque este proceso de introducción y consolidación de la electromovilidad en el sistema de transporte público ha sido exitoso, la gran cantidad de buses eléctricos puestos en marcha son de tipologías iguales o menores a los 12 metros. Dentro de este contexto, este estudio analiza el desempeño de un bus eléctrico articulado de 18 metros dentro del sistema Red para evaluar las perspectivas de operación de buses de mayor tamaño en rutas de Santiago de Chile.

Las secciones siguientes presentan las rutas analizadas factibles de electrificar, el modelamiento de consumo de energía del bus y los resultados y conclusiones sobre la implementación de estas tecnologías en el contexto operacional del sistema RED.

CARACTERÍSTICAS DE LAS RUTAS OPERADAS CON EL BUS ELÉCTRICO

Entre noviembre de 2020 y agosto de 2022, se piloteó y calculó el consumo energético de un bus eléctrico articulado de 18 metros operando en las rutas 430 y 435 (ida y retorno) del Red. El bus piloteado (Figura 1) es de la marca Zhongtong, modelo LCK6122EVB, con batería con capacidad de 525 kWh.



Figura 1. Bus eléctrico articulado Zhongtong, modelo LCK6122EVG

Fuente: Staff Microbuses.cl. Troncal 430 Express | Zhong Tong - LCK6122EVG Articulado, recuperada marzo 2023, https://www.microbuses.cl/galeria/details.php?image_id=18721.

La Tabla 1 presenta algunas características y trazados de las rutas en las cuales operó el bus eléctrico.

Tabla 1. Características de rutas operadas con el bus eléctrico de 18 m

Ruta	Servicio	Distancia (km)	Sentido	Frecuencia punta mañana (bus/hora)	Frecuencia punta tarde (bus/hora)
430 ida	Quilicura - La Dehesa	33,7	Ida	12	7
430 retorno	La Dehesa - Quilicura	32,9	Retorno	9	11
435 ida	Quilicura - Vitacura	25,1	Ida	9	5
435 retorno	Vitacura - Quilicura	24,8	Retorno	7	8

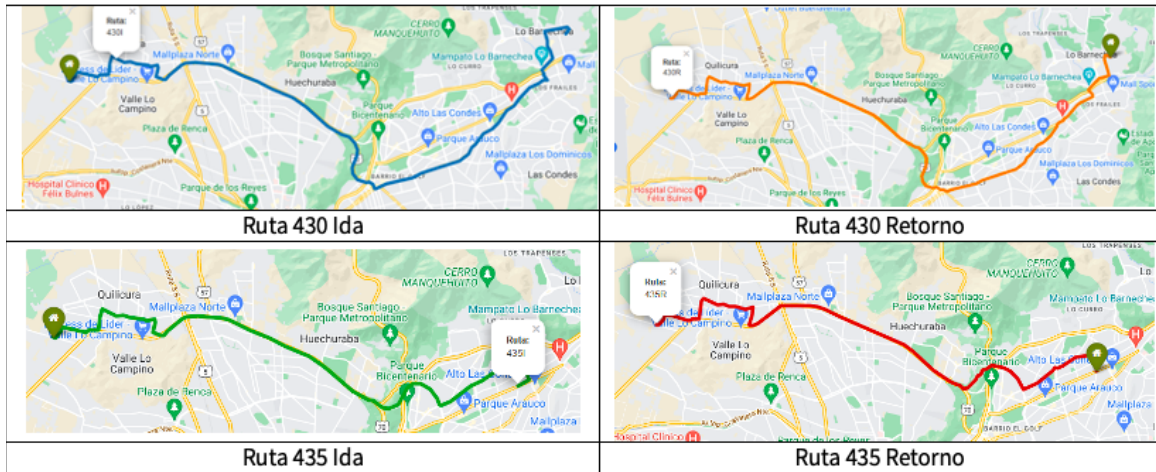


Figura 2. Trazado de rutas operadas con el bus eléctrico de 18 m

La ruta 430 posee 58 paradas, va desde la comuna de Quilicura hasta Lo Barnechea y opera desde la 1:00 hasta las 23:00 horas, en una jornada de 22 horas. La ruta 435 posee 36 paradas y va desde la comuna de Quilicura hasta la de Vitacura con un horario de 6:30 a 23:40 horas, es decir, en una jornada de 17 horas. Con relación a sus características físicas, ambas rutas operan en dirección oriente-poniente de la ciudad con pendientes promedios entre 1,5% a 3% en cerca de 35 km de longitud; en las zonas más empinadas se encuentran valores sobre 20% en algunos tramos de la ruta (en el sector oriente de la ciudad).

ANÁLISIS DE DATOS MEDIDOS EN EL PILOTAJE DEL BUS

El Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) proporcionó datos sobre la operación diaria del bus, incluido el kilómetro del odómetro al inicio y final del día, estado de carga (SOC, por su sigla en inglés) de la batería antes y después de la carga y el cálculo del consumo (kWh/km) diario del bus. Al contener información agregada por día, la base de datos no indica en qué hora el bus operó en la ruta 430 o en la 435.

A continuación se presentan los consumos calculados por 335 días de operación del bus, junto con una tabla con la información estadística, donde se indica que el consumo promedio diario fue de 1,34 kWh/km.

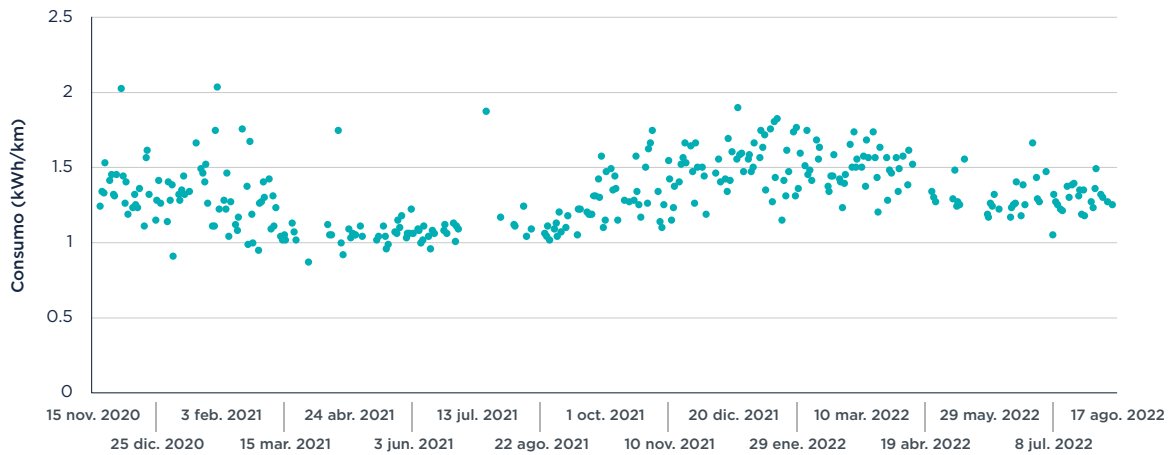


Figura 3. Consumo diario (kWh/km) del bus eléctrico operando en las rutas 430 y 435

Tabla 2. Estadística del consumo (kWh/km) del bus eléctrico de 18 m

Consumo diario (kWh/km)	
Media	1,34
Error típico	0,01
Mediana	1,32
Moda	1,12
Desviación estándar	0,24
Rango	1,86
Mínimo	0,66
Máximo	2,52

MODELACIÓN VIRTUAL DEL BUS ELÉCTRICO

METODOLOGÍA

La metodología general que se siguió es descrita en la Figura 4. En resumen, fueron construidos perfiles de conducción a través de una serie de algoritmos, datos de GPS y trazos consolidados correspondientes a las rutas estudiadas, que fueron facilitados por el DTPM. Posteriormente, se utilizó un modelo virtual de bus desarrollado por ICCT y se simularon los perfiles de conducción. Finalmente, estos resultados permitieron el cálculo de los indicadores clave de desempeño (KPIs, por su sigla en inglés) de la operación del bus sobre estas rutas.

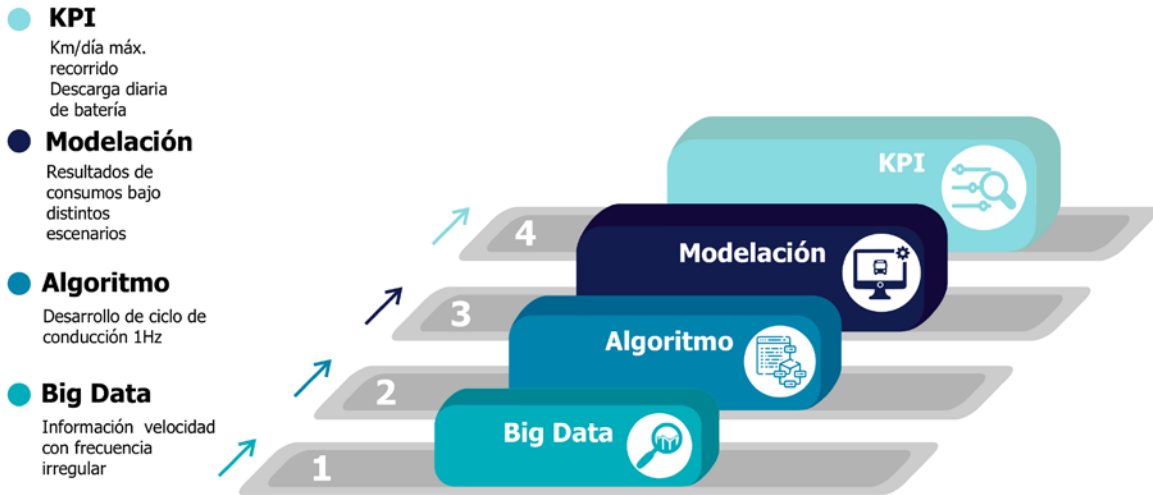


Figura 4. Procedimiento general para el análisis de rutas y la factibilidad técnica de ser incluidas
Fuente: CMM, usado con permiso.

OBTENCIÓN DE PERFILES DE VELOCIDAD Y ALTITUD

La Figura 5 describe el procedimiento para la obtención de los perfiles de conducción de las rutas consideradas para este estudio. A continuación, se detallan la metodología paso por paso, junto con los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

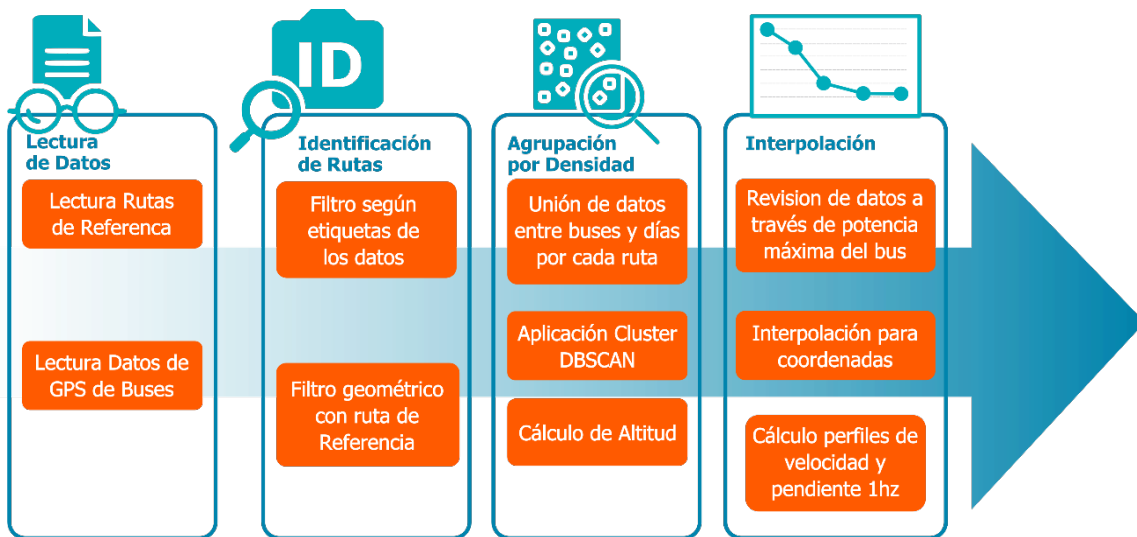


Figura 5. Procedimiento utilizado para la obtención de los perfiles de velocidad, altitud y pendiente
Fuente: CMM, usado con permiso.

LECTURA E IDENTIFICACIÓN DE RUTAS

La información proporcionada por DTPM consistió en datos de GPS de operación correspondientes a la semana del 9 al 15 de mayo de 2022 y a 570 rutas con distintos sentidos y trayectos¹, cuyos datos tenían una frecuencia promedio de 60 segundos. Además de las de coordenadas, la información contenía datos de velocidad e identificadores de la ruta. Dentro de la información proporcionada por DTPM, se encontraban los trazos que cada ruta debe recorrer, determinados por el Ministerio y correspondientes a la ruta de referencia.

La primera identificación corresponde a filtros relacionados con el identificador del vehículo (patente), la ruta separada por el sentido (es decir, el trayecto en un sentido es diferenciado respecto al trayecto en sentido contrario) y el día de la información recopilada.

Luego de esta primera identificación, los datos fueron sometidos a un filtrado geométrico. En resumen, una máscara fue construida a partir de los puntos de GPS del trazo correspondiente a la ruta de referencia. Las rutas fueron filtradas a partir de un número mínimo de puntos que debía contener cada conjunto de datos GPS y del parámetro de movilidad que se explica a continuación.

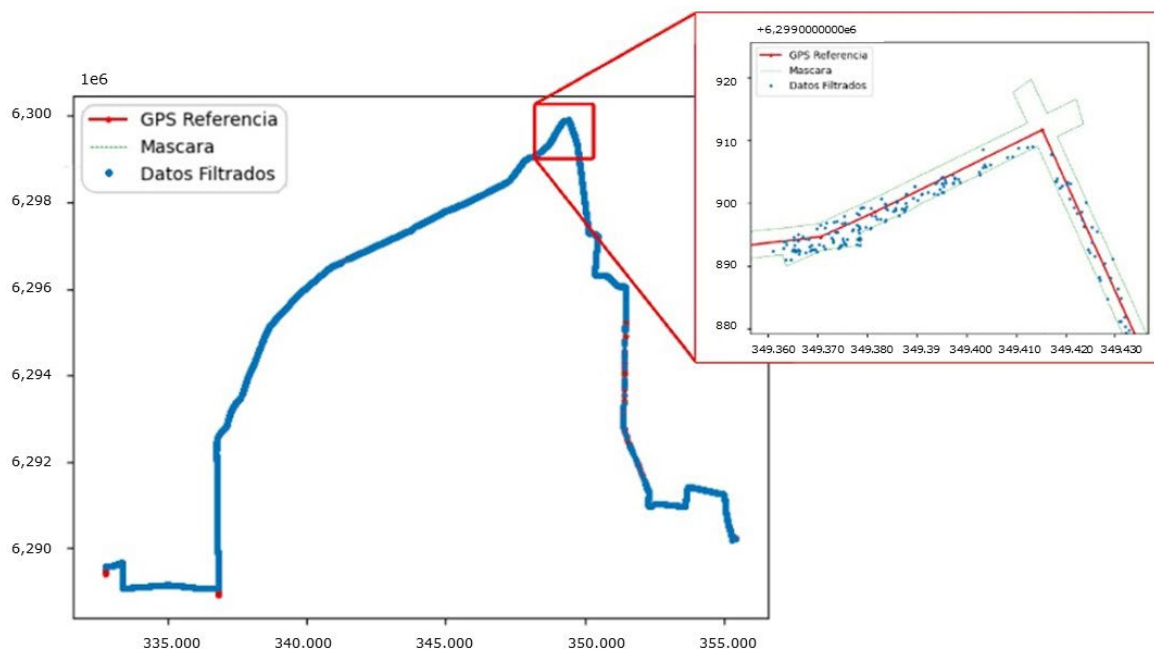


Figura 6. Filtro geométrico

¹ Se realizaron perfiles de conducción y de altitud representativos de las dos rutas piloteadas.

La información del GPS no identificaba correctamente el número de recorrido que realizaba el bus y al que corresponden cierta cantidad de datos de GPS. Para la identificación de los recorridos y rutas, se identificaron saltos de tiempo. Según los datos, la frecuencia promedio es de 1/45 hz, es decir: 1 dato cada 45 segundos con un error del 3%. Se consideró que diferencias de tiempo sobre 3 veces este valor serían consideradas saltos de tiempo.

$$T_{jump} = t_i - t_{i-1} \geq 45 \times 3$$

Cada conjunto de datos separados por bus, día y ruta ahora también fueron identificados entre saltos de tiempo con un ID denominado "recorrido". De esta manera, el subconjunto no podría tener saltos de tiempo mayores a 2,45 minutos.

Posteriormente se calcularon los tiempos, velocidades y distancias promedio de cada ruta y sus desviaciones estadísticas. También se calculó el parámetro "movilidad", que relaciona la distancia directa del recorrido respecto a la distancia del trayecto. Es decir:

$$MOV = \frac{\|r_{fin} - r_{ini}\|}{\sum_k^n \|r_k - r_{k-1}\|}$$

Donde $r_{ini,fin}$ son las posiciones inicial y final del trayecto, mientras que r_k son las posiciones en cada punto del trayecto. Cada ruta de referencia tenía un parámetro de movilidad, calculado a partir de las coordenadas georreferenciadas, y a su vez, cada subconjunto de datos de día, bus y recorrido.

Por otro lado, el número de puntos en general puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$N = \frac{f_{prom} \times d_{ref}}{v_{prom}} - \epsilon = \frac{d_{ref}}{T_{prom} v_{prom}} - \epsilon = \left(\frac{1}{v_{prom}} \right)^2 - \epsilon$$

Donde v es la velocidad promedio, f es la frecuencia de adquisición de datos promedio y d la distancia referencia. Al reescribir los parámetros, la relación queda solo dependiente de la velocidad promedio de cada subconjunto de datos y su error estadístico (ϵ), que se calculó mediante:

$$\epsilon = \epsilon_v = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum (v_k - v_{prom})^2}{n - 1}}$$

Con los cálculos anteriores, cada conjunto de recorridos fue sometido a las siguientes condiciones para poder ser considerado un recorrido de la ruta:

$$N_{gps} \geq N_{min}$$
$$Mov_{gps} - Mov_{ref} \leq 10\%$$

De esta manera se continuó con el proceso de agrupamiento para construir un perfil característico de la ruta.

AGRUPACIÓN POR DENSIDAD

Para la obtención de puntos GPS representativos, se aplicó una técnica de agrupamiento automático DBSCAN² a los datos filtrados, con información de los pasos de tiempo y pasos de distancias por cada grupo de datos, separados por ruta. Con esto, para una ruta determinada, cada agrupamiento contiene un conjunto de puntos de GPS, con valores Δt y Δr para cada punto.

DBSCAN es una técnica que se basa en la densidad de puntos, la que se define cómo el número mínimo de estos dado un radio condicionado. El algoritmo asigna a los puntos una etiqueta de ruido, punto nuclear y punto de borde, dependiendo de si cumple con las condiciones de número mínimo de puntos y está dentro del radio asignado³.

Para cada agrupamiento, se calcularon los centroides y se buscaron los puntos de GPS más cercanos a estos (GPS_{REP}); así mismo, se calcularon los promedios para cada parámetro mencionado anteriormente.

Los puntos de GPS_{REP} debieron ser reordenados utilizando la ruta de referencia. Con los valores promedio de Δt se construyó el vector tiempo para los puntos de GPS_{REP} , corregidos con la ayuda de los parámetros Δr , w y la distancia recorrida por la ruta de referencia.

FILTRADO POR POTENCIA MÁXIMA

La identificación de un recorrido dado por la ruta de referencia permitió identificar el perfil de velocidad y la altitud en un rango acotado de operación. Sin embargo, las mediciones asociadas a velocidad y aceleración poseen fallas que pueden deberse a movimientos bruscos del equipo, a la telemetría de la información o a la mala lectura automática por acumulación de errores, que se arrastran a lo largo de los cálculos.

2 De la sigla del concepto Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, o agrupamiento espacial basado en densidad de aplicaciones con ruido.

3 Para más información, ver Sebastian Raschka y Vahid Mirjalili, *Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow* (Birmingham: Packt, 2019): 372-377; Ting Luo, Xinwei Zheng, Guanglan Xu, Kun Fu y Wenjuan Ren, "An Improved DBSCAN Algorithm to Detect Stops in Individual Trajectories," *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, no. 3 (2017), <https://doi.org/10.3390/ijgi6030063>.

Para la eliminación de datos irreales, se realizó un análisis de fuerzas basado en condiciones ideales de conducción y la máxima capacidad que el motor del bus podía entregar. En general, las principales fuerzas presentes en la conducción están relacionadas mediante la siguiente ecuación (1):

$$F_{traccion} = m_e a_{vehicle} + \left(\frac{1}{2} \rho_{air} C_{drag} S v_{vehicle}^2 + m_e g C_{rolling} + m_e g \cos(\Theta) \right) \quad (1)$$

Donde $F_{traccion}$ es la fuerza de tracción que emplea el vehículo, m_e es la masa equivalente de este (que consideró 1,6 veces la masa del vehículo en vacío), $a_{vehicle}$ corresponde a la aceleración, ρ_{air} es la densidad del aire, C_{drag} es el coeficiente de arrastre aerodinámico, S es la superficie frontal y $v_{vehicle}$ es la velocidad del vehículo.

A partir de la fuerza de tracción (ver la ecuación (1)) empleada por el vehículo, es posible calcular la potencia, dada por la ecuación (2):

$$P_{vehicle} = F_{traccion} v_{vehicle} \quad (2)$$

Por otra parte, la potencia máxima a la que un vehículo puede llegar, sin considerar pérdidas, está dada por la aceleración y la velocidad máximas del vehículo, como se ve en la ecuación (3):

$$P_{max} = a_{max} m_e v_{max} \quad (3)$$

Al igual que la potencia máxima ideal, la fuerza de adhesión permite identificar valores de aceleración irreales. Aquella fuerza de tracción mayor a la fuerza de adhesión máxima posible significa un resbalamiento de las ruedas. La fuerza está dada por la ecuación (4):

$$F_{adhesion} = \mu_{adhesion} m_e g \left(\frac{N_w}{N_T} \right) \quad (4)$$

INTERPOLACIÓN

Luego de la aplicación del agrupamiento y obtener los valores de velocidad, distancia y tiempos promedio para cada subconjunto de datos GPS, se calculó un primer perfil de velocidad. A este se le introdujeron paradas teóricas, correspondientes al número de paradas de la ruta. Al no tener información de las paradas, se estimó un valor mediante la distancia total de la ruta de referencia y se consideró un factor de 500 metros en general. Es decir:

$$N_{stops} = \frac{D_{ref}}{500}$$

El ciclo preliminar fue dividido en N_{stops} veces y se agregaron tiempos de paradas de 10 segundos. Se aplicó una interpolación cúbica y, posteriormente, se suavizaron aquellas zonas mediante el filtro de potencia máxima, eliminando puntos donde, dada una pendiente, existían márgenes de velocidad y aceleración que deben ser correspondientes a la potencia máxima del vehículo.

DESARROLLO DE BUS VIRTUAL

Para las modelaciones del presente reporte, se utilizaron los resultados de un estudio realizado en Ciudad de México, donde se piloteó un bus eléctrico⁴ articulado de 18 m, cuyas características se presentan en la Tabla 3 y en la Figura 7.

Tabla 3. Características del bus virtual

Bus	Capacidad de batería (kWh)	Tipo de batería	Medidas (largo x ancho x alto) (m)	Velocidad máxima (km/h)	Peso bruto (kg)	Motor	Asientos
18 metros	563	Fosfato de hierro de litio	18,21 × 2,25 × 3,57	60	30.000	Dos motores 150/260 kW	33 + 1 conductor + área silla de ruedas

La herramienta empleada fue Amesim⁵, la cual realiza la simulación a partir de las características de los vehículos y sus componentes, permitiendo estimar consumos de energía y autonomía y análisis de indicadores de desempeño para distintas configuraciones de un vehículo. La herramienta simula el comportamiento de un vehículo que opera en una ruta bajo condiciones definidas por el usuario. Para esto, se debe desarrollar un modelo virtual del vehículo a partir de la configuración de cada uno de sus componentes y sistemas, que para el caso de un vehículo eléctrico 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.

4 Gonzalo García Miaja et al., *Analysis of Electric Bus Performance Monitoring in Mexico City* (ICCT/ZEBRA, 2023), <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-analysis-elec-bus-performance-cdmx-jan23/>.

5 "Simcenter Amesim Software," Siemens, <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/systems-simulation/amesim/>.



Figura 7. Bus eléctrico articulado Yutong modelo E18-ZK6180BEVG⁶

Fuente: Foto de Carlos Jiménez, recuperada de Miaja et al., *Analysis of Electric Bus Performance Monitoring in Mexico City*.

El bus, según el fabricante, puede ser cargado una vez en el mediodía y una vez en la noche, con la pistola de carga tipo dos a 300 kWh. El tiempo de carga para esta configuración es de 2 horas en la noche y 40 minutos en el mediodía, durante el descanso del bus. Según pruebas del fabricante, el consumo de electricidad general bajo condición de carretera urbana es de 1.4 (kWh/km).

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 la posterior simulación de consumo de energía con el modelo de bus virtual.

CICLOS DE CONDUCCIÓN REPRESENTATIVOS

Por parte de la modelación, se utilizaron perfiles de conducción correspondientes a las rutas de los recorridos 430 y 435. Se desarrollaron

⁶ Miaja et al., *Analysis of Electric Bus Performance Monitoring in Mexico City*.

gráficos con la información de GPS, elaborando perfiles de velocidad y altura con una resolución de 1 segundo. Esto corresponde a un perfil característico obtenido de varios trayectos realizados por distintos buses en distintos horarios.

En general, las velocidades en promedio son de 12 km/h, con máximas de 50 km/h. El tramo donde las pendientes se mantienen en elevación corresponde al trayecto con destino a la comuna de Lo Barnechea, en donde la altitud es mayor que la de la comuna de Quilicura.

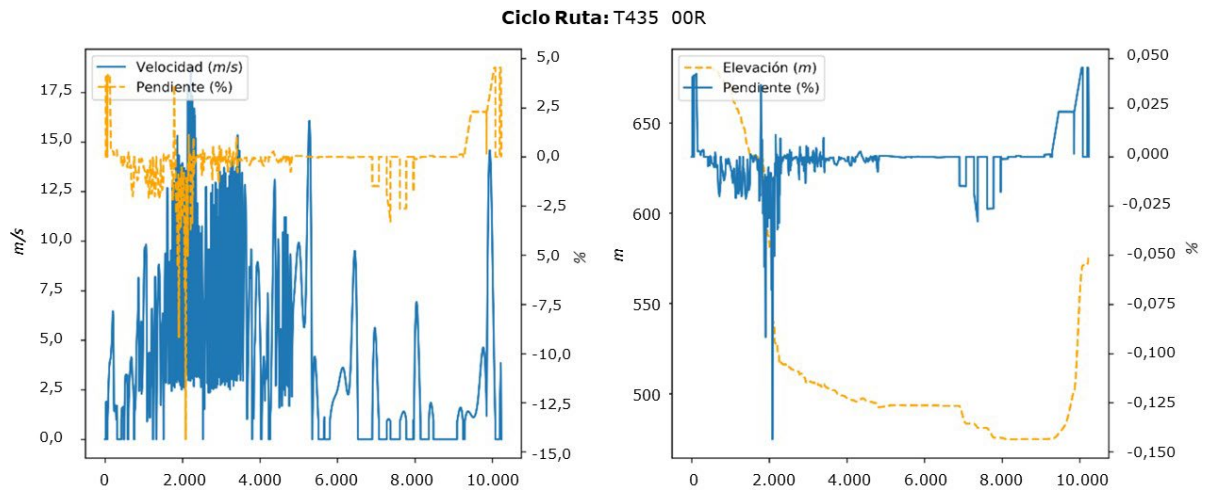


Figura 8. Perfiles de velocidad y elevación de la ruta 435r

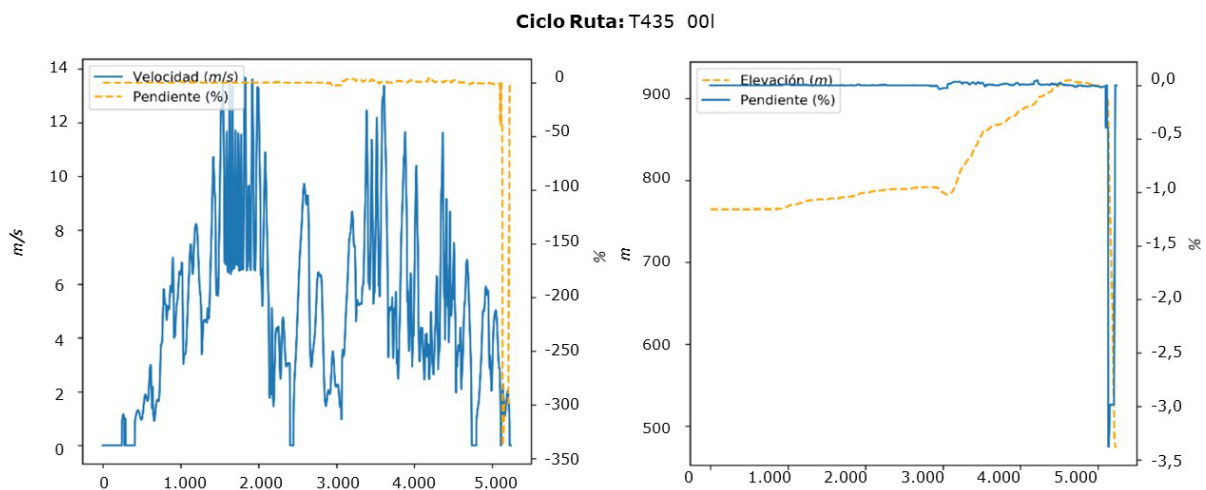


Figura 9. Perfiles de velocidad y elevación de la ruta 435i

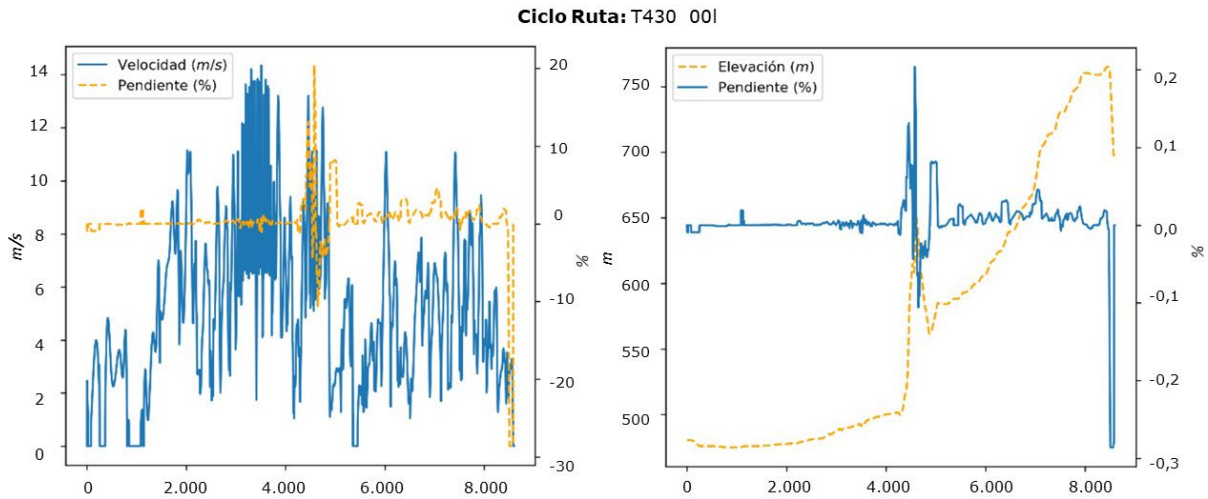


Figura 10. Perfiles de velocidad y elevación de la ruta 430I

MODELACIÓN DE BUSES ELÉTRICOS A BATERÍA (BEBS) Y CÁLCULO DE KPIS

Con el bus virtual se modelaron los perfiles presentados en el apartado anterior, considerando cuatro condiciones con distintas cargas de pasajeros y el funcionamiento o no del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por su sigla en inglés).

Es importante destacar que la variable “carga de pasajeros” simula el consumo de energía bajo un escenario donde, durante todo el ciclo de conducción, el bus opera sin pasajeros (0%), la mitad de su capacidad (50%) o con el máximo de pasajeros (100%) permitido por el bus.

Tabla 4. Características de las condiciones simuladas

Condición	Carga de pasajeros ⁷	Sistema HVAC ⁸
A	0%	Off
B	0%	On
C	50%	On
D	100%	On

⁷ 0%=0 kg, 50%=5.100 kg; 100%= 10.200 kg.

⁸ Considerando un consumo de energía del sistema HVAC de 0,2 kWh/km.

Las Figuras 11-14 presentan los perfiles de descarga considerando la condición de operación sin pasajeros y sin el sistema HVAC funcionando

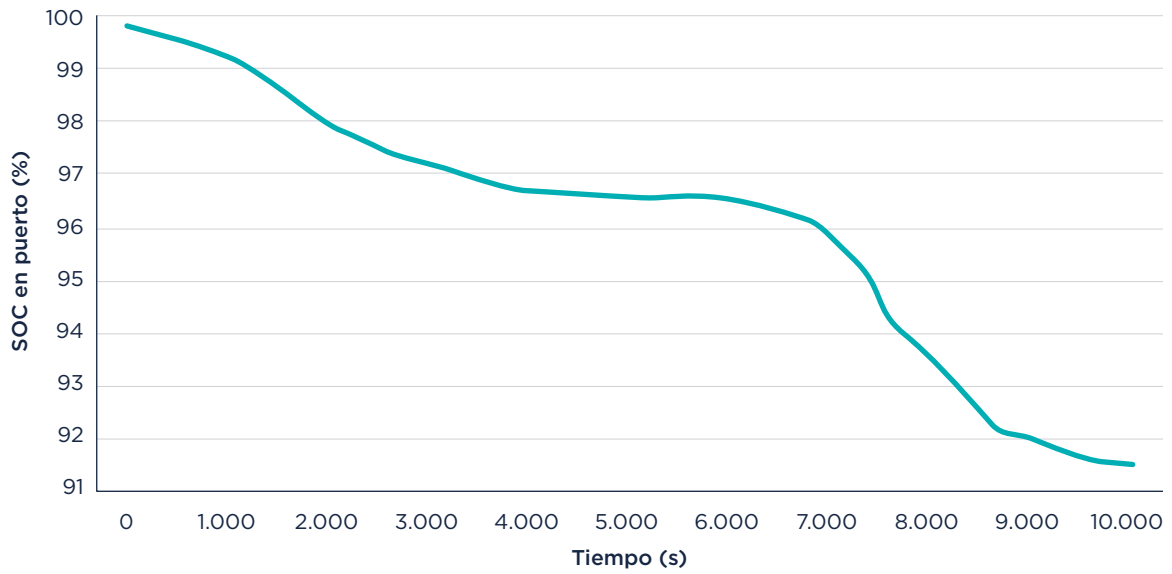


Figura 11. Perfil del estado de carga de la batería del bus operando la ruta 430R

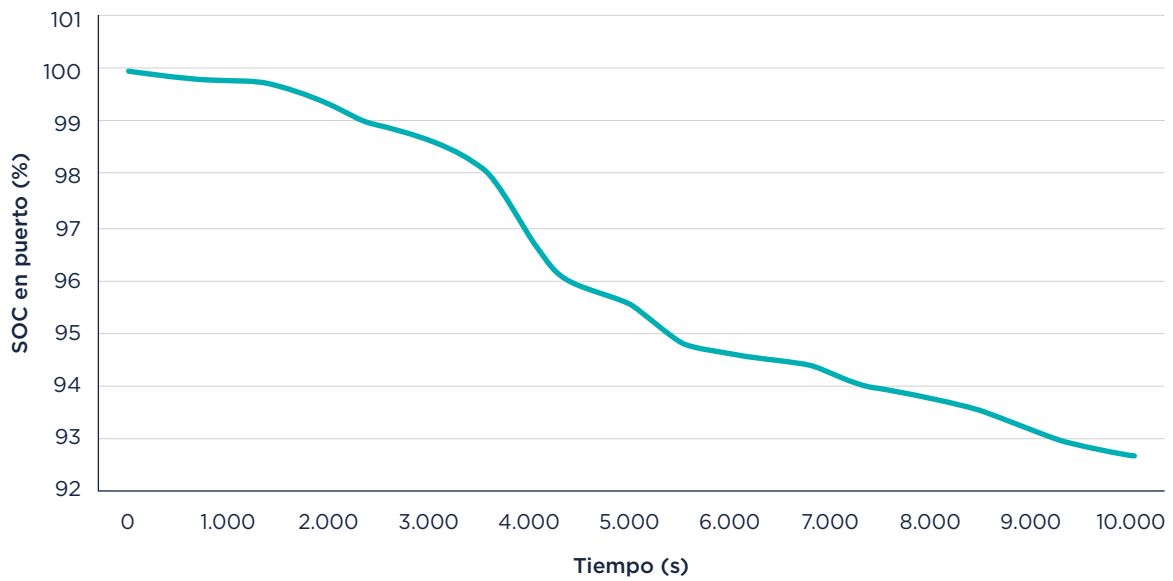


Figura 12. Perfil del estado de carga de la batería del bus operando la ruta 430I

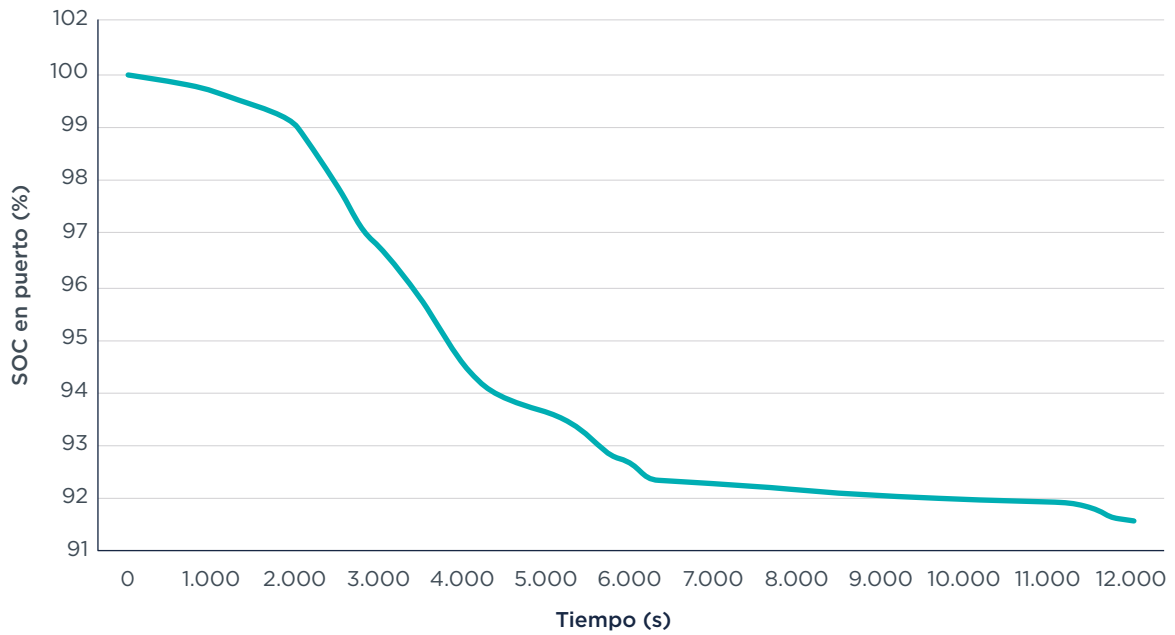


Figura 13. Perfil del estado de carga de la batería del bus operando la ruta 435R

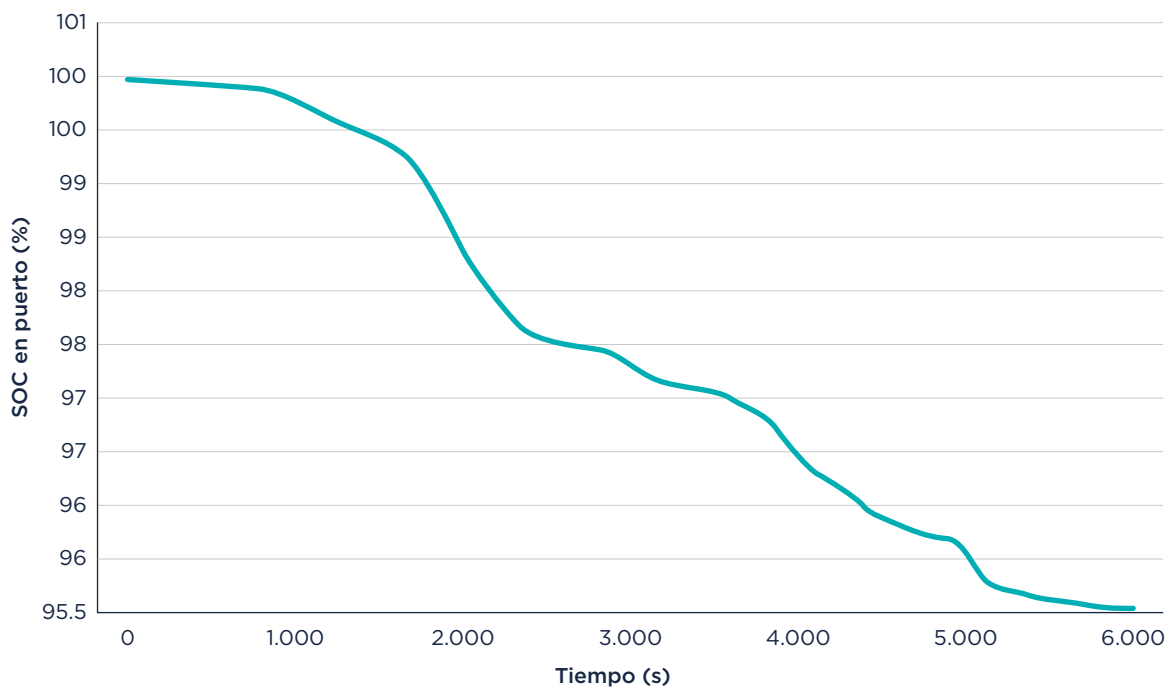


Figura 14. Perfil del estado de carga de la batería del bus operando la ruta 435I

La Tabla 5 presenta un resumen de los resultados de un bus con una capacidad de batería de 525 kWh, misma capacidad del bus piloteado en Santiago de Chile, operando bajo las condiciones B, C y D antes descritas. Se presenta resultados de la tasa del consumo eléctrico por kilómetro, autonomía en

kilómetro considerando una carga y salidas que podría realizar el bus antes de volver a cargar.

Tabla 5. Resumen de KPIs del bus eléctrico operando las rutas 430 y 435

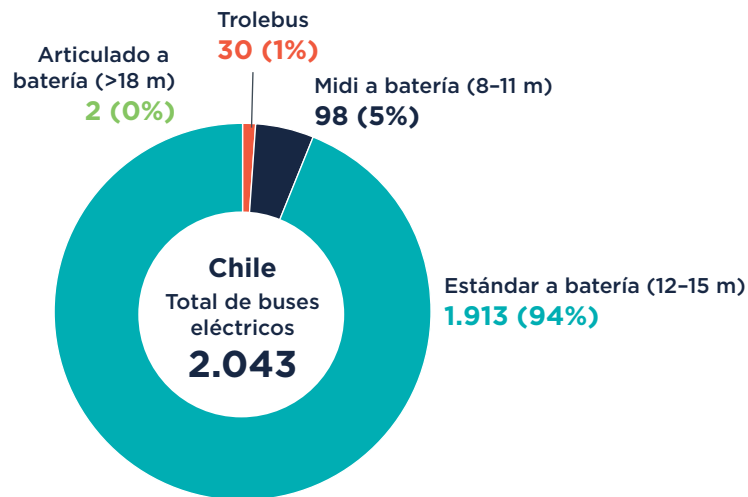
Ruta	Distancia ⁹ (km)	Tasa de consumo (kWh/ km)			Autonomía (km)			Número de salidas antes de recargar		
		B	C	D	B	C	D	B	C	D
430I	33,69	1,08	1,21	1,34	353	315	286	10	9	8
430R	32,86	1,04	1,16	1,28	369	330	299	11	10	9
435I	25,09	1,11	1,25	1,39	345	306	275	14	12	11
435R	24,76	1,57	1,75	1,89	244	219	202	10	9	8
Promedio		1,20	1,34	1,47	328	292	265	11	10	9

Para el cálculo de la autonomía (km), se asumió que el bus comienza su operación con 100% de carga y finaliza cuando las baterías tienen 20%. Además, se incluyó 10% de mayor consumo por efecto del tipo de manejo del conductor.

DISCUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

Desde el año 2017 hasta la fecha, en la ciudad de Santiago de Chile se han incorporado más de 2.000 buses eléctricos en la operación del transporte público, de los cuales la totalidad corresponden a buses de 12 m. Este hecho es consecuencia del mayor mercado internacional que existe de este tipo de bus, debido a la maduración tecnológica de este segmento y a los costos de adquisición.

⁹ Distancia del recorrido indicado en el programa operacional.



21,38% de los buses en las ciudades de este país incluidas en la plataforma E-Bus Radar (9.557)

Figura 15. Buses del transporte público eléctricos en Chile, 2023¹⁰

El presente reporte modela un bus articulado eléctrico de 18 metros en comparación con los resultados de la operación en Santiago. A pesar de tener la información agregada por día y solo la indicada por el panel del conductor, ya que no se midieron directamente los voltajes para el cálculo del consumo, se pudo obtener un promedio de este indicador del bus operando en dos rutas de la red de transporte público.

¹⁰ Información disponible en la plataforma E-Bus Radar, <https://www.ebusradar.org/es/>; datos a diciembre de 2023.

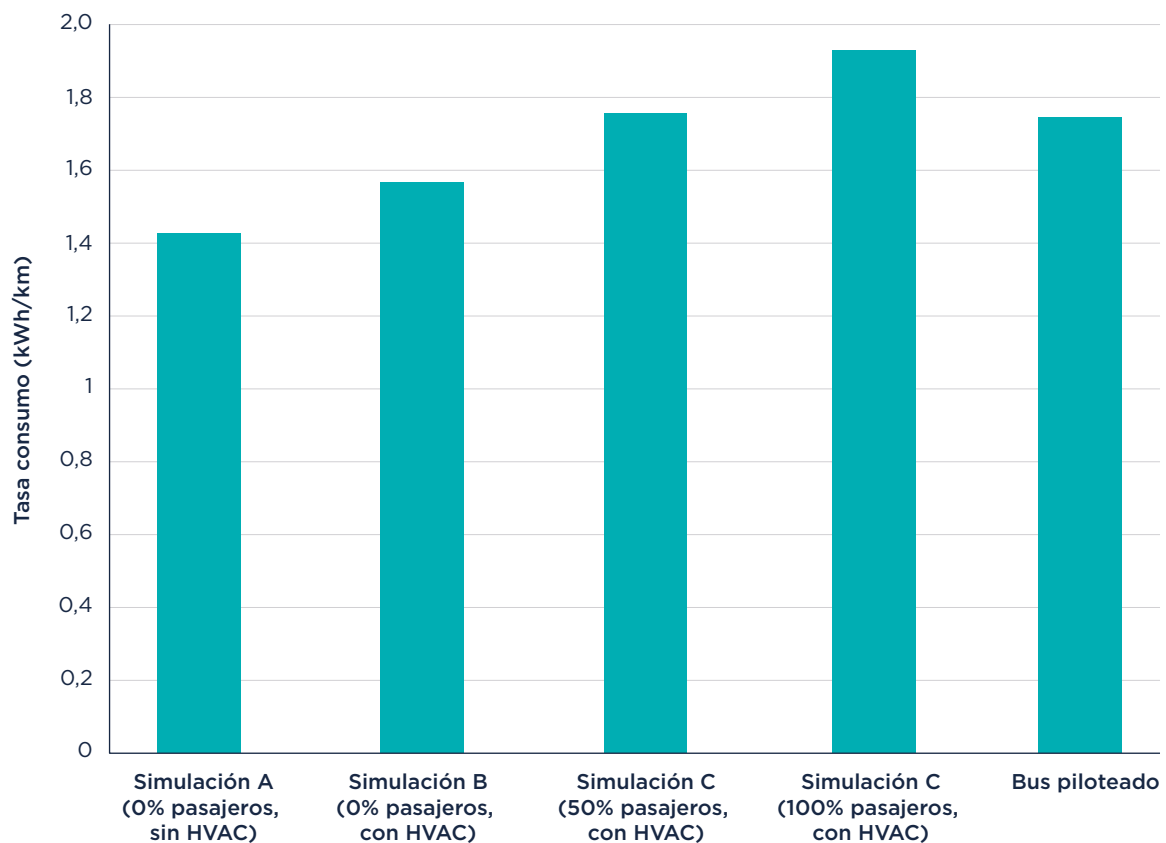


Figura 16. Tasas de consumo simuladas y piloteada del bus eléctrico de 18 m

Es así, como el promedio de consumo del bus eléctrico en terreno fue de 1,34 kWh/km, presentando el mismo resultado que el promedio del bus modelado en la operación de estas mismas rutas en condiciones de 50% de carga de pasajeros y con el sistema HVAC funcionando. Con relación a la autonomía, los resultados de la modelación indican que el bus podría operar cerca de 300 km con una sola carga.

CONTACTO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org



SOCIOS IMPLEMENTADORES