



# ANÁLISIS DEL MONITOREO DE DESEMPEÑO DE AUTOBUSES ELÉCTRICOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO



SOCIO DE APOYO



AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES



**Elaborado por:** Gonzalo García Miaja, Helmer Acevedo, Carlos Jiménez, Leticia Pineda y Oscar Delgado.

Este reporte fue desarrollado para el Sistema Metrobús de la Ciudad de México como parte de la Iniciativa ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator).

Los autores agradecemos a Metrobús, MIVSA, Yutong y VEMO por las facilidades y todo el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto. Agradecemos también a los revisores internos y externos, Carlos Bueno, Francisco Posada, Candi Domínguez, César Serrano, Gabriela de la Torre y Jocelyn Delgado. Cualquier error es responsabilidad de los autores.

Agradecemos a las iniciativas P4G y TUMI E-Bus Mission por su generoso apoyo financiero para el desarrollo de este proyecto.



# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>AUTOBUSES ELÉCTRICOS EN EL SISTEMA METROBÚS</b> .....	<b>2</b>
<b>MONITOREO DEL AUTOBÚS ARTICULADO ELÉCTRICO</b> .....	<b>3</b>
Monitoreo con equipos de telemetría.....	4
Periodo de monitoreo.....	5
<b>RESULTADOS DEL MONITOREO</b> .....	<b>6</b>
Distancia diaria recorrida.....	6
Consumo de energía neta.....	8
Consumo de energía por kilómetro recorrido.....	10
Velocidad media diaria.....	12
Regeneración de energía.....	12
Tiempo en ralentí.....	14
<b>PRUEBAS DE LASTRE</b> .....	<b>16</b>
Información del Sistema de Recarga.....	19
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>21</b>

## INTRODUCCIÓN

El sector transporte contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que intensifican el calentamiento global y la emisión de contaminantes criterio, como son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el material particulado (PM), que afectan la calidad del aire y la salud de la población. Una opción para reducir simultáneamente las emisiones GEI y los contaminantes ambientales locales es actualizar el sector con flotas cero emisiones. En este sentido, muchas ciudades del mundo están realizando esfuerzos para migrar hacia flotas eléctricas de transporte.

La Ciudad de México se ha propuesto ser carbono-neutral hacia 2050 y, a través de diversos programas y acciones, ha adquirido compromisos para reducir las emisiones de este sector. Durante la presente administración (2018-2024) se ha avanzado en movilidad eléctrica con el establecimiento de compromisos tangibles a través de instrumentos como son el Programa de Acción Climática de la CDMX 2021-2030, la Estrategia de Acción Climática 2021-2050<sup>1</sup> y el Plan de Reducción de Emisiones del Sector Movilidad<sup>2</sup>, el cual establece como meta reducir en 30 % las emisiones de contaminantes criterio de fuentes móviles en 2024. Adicionalmente, la Ciudad de México es signataria de la Declaración Calles Verdes y Saludables<sup>3</sup> de C40, en la cual se ha comprometido a partir de 2025 a que todos los autobuses que sean adquiridos sean cero emisiones.

Las flotas de transporte público se han identificado como uno de los segmentos vehiculares con mayor potencial de transición exitosa hacia tecnologías cero emisiones en el corto plazo. En términos generales, son flotas relativamente pequeñas, con operación intensiva en rutas determinadas y son reguladas por organismos del gobierno local, lo que podría facilitar la planeación, el financiamiento y la introducción de flotas eléctricas, junto con su respectiva infraestructura de recarga.

Entre las acciones más destacadas en electromovilidad en la Ciudad de México, se encuentran el compromiso de implementar 4 líneas de Cablebús, de las cuales actualmente hay dos operando; el incremento de la red de Trolebuses mediante la adquisición de 500 unidades, de las cuales 193 se adquirieron entre 2019 y 2020; y la integración de una línea de Metrobús cero emisiones, que operará con autobuses articulados eléctricos.

1 Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (s.f.) "ESTRATEGIA LOCAL DE ACCIÓN CLIMÁTICA 2021-2050 PROGRAMA DE ACCIÓN CLIMÁTICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO 2021-2030", [http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca\\_cc/PACCM-y-ELAC\\_uv.pdf](http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/PACCM-y-ELAC_uv.pdf).

2 Gobierno de la Ciudad de México, (s.f.) "PLAN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DEL SECTOR MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE MÉXICO", <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/storage/app/media/plan-reduccion-de-emisiones.pdf>.

3 C40 Cities, "Green & Healthy Streets Accelerator", (s.f.), <https://www.c40.org/accelerators/green-healthy-streets/>

## AUTOBUSES ELÉCTRICOS EN EL SISTEMA METROBÚS

Metrobús, el Sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) de la Ciudad de México<sup>4</sup>, ha comenzado su transición rumbo a la electromovilidad. Desde 2020, este organismo en colaboración con empresas fabricantes y el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés), han evaluado autobuses de diferentes fabricantes y tipologías, de acuerdo con las características reales operativas de las diferentes líneas del sistema.

Como resultado de las evaluaciones, en 2021 la Línea 3 de Metrobús incorporó a su flota 9 autobuses articulados eléctricos, para lo cual se instalaron 7 cargadores en el patio de encierro. Durante la presentación oficial de estos vehículos, se hizo público el compromiso para que la renovación del resto de la flota que opera en esta línea esté conformada por autobuses eléctricos, en sintonía con los compromisos de la ciudad, para que al 2024 una línea de Metrobús sea eléctrica. En seguimiento a estas acciones, se prevé que en el primer trimestre de 2023 operen 51 autobuses articulados eléctricos adicionales (60 en total) y se concluya la instalación de la infraestructura de recarga necesaria para operar la flota (25 cargadores adicionales) en el patio de encierro.

En paralelo, después de haber evaluado vehículos eléctricos de varios fabricantes, se encuentra activo el proceso de planeación para la adquisición de 19 autobuses eléctricos para la Línea 4, así como la infraestructura de recarga requerida para su operación. Los planes a mediano plazo son renovar gradualmente toda la flota de la Línea 4 a vehículos eléctricos.

De acuerdo con las reglas de operación establecidas por Metrobús para la renovación de vehículos, los autobuses que operan en el sistema deberán ser renovados tras cumplir 10 años de operación, con excepción de los autobuses doble piso, para los cuales se establece un plazo de quince años. En consideración de lo anterior, se espera que la renovación de la flota del sistema alcance 508 autobuses en el año 2030<sup>5</sup>, lo que representa 65 % de la flota actual, por lo que se ha identificado una gran oportunidad para promover que se transite hacia la electrificación del sistema.

<sup>4</sup> <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>

<sup>5</sup> Leticia Pineda, Carlos Jimenez y Oscar Delgado, *Estrategia para el despliegue de flota eléctrica en el Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de México "Metrobús": líneas 3 y 4*, (ICCT: Washington, DC, 2022) <https://theicct.org/publication/mexico-latam-hdv-zebra-mar22/>.

## MONITOREO DEL AUTOBÚS ARTICULADO ELÉCTRICO

En esta sección se analiza el desempeño operacional del autobús articulado eléctrico monitoreado, a través del análisis de los parámetros técnicos y operativos registrados. Entre otros, se evalúa la distancia recorrida, el consumo de energía, en términos absolutos y relativos con respecto a la distancia recorrida, la velocidad media, la regeneración de energía mediante el frenado regenerativo y los periodos en ralentí.

El análisis se complementó con una serie de pruebas de lastre, lo cual permitió hacer mediciones más precisas del consumo energético para distintas condiciones de carga<sup>6</sup>. A continuación se presentan y analizan los resultados de dichas pruebas, para establecer una correlación entre el consumo energético y la carga transportada.

El vehículo monitoreado es un autobús articulado eléctrico de 18 m y piso alto, con capacidad para transportar 160 pasajeros, modelo E18-ZK6180BEVG fabricado por la empresa China, Yutong. Dispone de un banco de baterías LFP (Ferrofosfato de Litio) de 564 kWh, dos motores eléctricos con potencia de 150/260 kW y una autonomía estimada en más de 300 km. Las principales características técnicas se presentan en la tabla 1. Considerando las condiciones climáticas de la Ciudad de México, el autobús no está equipado con sistemas de aire acondicionado ni calefacción.

Durante el periodo de evaluación el autobús operó en la Línea 3 del Metrobús, cubriendo las jornadas de servicio en las mismas condiciones que el resto de la flota de autobuses de combustión interna. Esto permitió registrar información representativa de la operación, que además puede ser empleada para la calibración de modelos de simulación para predecir el consumo energético en otros escenarios de operación. Esta línea presta servicio a lo largo de 20.4 km entre Tenayuca, al noroeste, y Pueblo Santa Cruz Atoyac, al centro-sur de la ciudad. La circulación se realiza mayoritariamente por la Avenida Vallejo y el Eje 1 Poniente, un recorrido relativamente plano que cuenta con una pendiente máxima de 6 grados, a lo largo del cual están distribuidas 37 estaciones y 6 terminales.

<sup>6</sup> Gonzalo García Miaja, Carlos Jiménez, Helmer Acevedo, Leticia Pineda, Oscar Delgado, *Consumo energético de autobuses eléctricos articulados para distintos niveles de carga en el BRT de la Ciudad de México* (ICCT: Washington, DC, 2022), <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-consumo-energetico-busescdmx-nov22/>.



**Figura 1.** Autobús articulado eléctrico Yutong modelo E18-ZK6180BEVG. Foto: Carlos Jiménez.

**Tabla 1.** Características técnicas del autobús articulado eléctrico.

PARÁMETRO	VALOR
Marca	Yutong
Modelo	ZK6180BEVG
Largo * Ancho * Alto (mm)	18 210 * 2550 * 3570
Radio de giro (m)	23
Peso vehicular (kg)	19 800
Peso bruto vehicular (kg)	30 000
Carga máxima de pasajeros	160
Potencia nominal (kW/rpm)	150/260
Torque nominal (N.m/rpm)	1450/3200
Baterías	LFP (Ferrofosfato de litio)
Capacidad de las baterías (kWh)	564

## MONITOREO CON EQUIPOS DE TELEMETRÍA

Por medio de equipos de telemetría, es posible monitorear y registrar la operación diaria de los vehículos eléctricos, ya que permiten la recolección de datos operativos en tiempo real (como lo son GPS, estado de carga de la batería, velocidad, distancia recorrida, entre muchos otros), los cuales

se pueden transmitir y almacenar en plataformas digitales para su análisis. Esta información es relevante para poder determinar el desempeño de los vehículos, ya que todas las variables operativas son registradas continuamente. Así, se pueden identificar errores o fallas en los diversos sistemas eléctricos, al igual que problemas mecánicos.

La captura de datos con equipos de telemetría se realiza por medio de la conexión a la línea de salida del CAN Bus del vehículo. El sistema CAN (*Controller Area Network*) es un protocolo centralizado a través del cual se comunican todas las unidades de control electrónico (ECU, *Electronic Controller Unit*) de los diferentes sensores y subsistemas que componen los vehículos, de tal forma que toda la información de la operación se puede monitorear y almacenar para su posterior análisis.

Una empresa de telemática fue contratada para proveer el equipo, así como el servicio de monitoreo y recolección de datos durante un año, el cual se realizó mediante la instalación de un dispositivo *Canlogger Guard v1.0*<sup>7</sup>. Este fue conectado de forma no intrusiva a la red CAN del autobús, accediendo a la información y convirtiendo los datos registrados al protocolo de comunicación SAE J-1939 para su interpretación y análisis.

## PERIODO DE MONITOREO

El monitoreo con se llevó a cabo del 23 de diciembre de 2020 al 19 de septiembre de 2021, un total de 270 días o 9 meses. Para los propósitos de este análisis, se excluyó la información de los días en los que el autobús circuló distancias inferiores a 50 kilómetros (45 días), por considerarse no representativos de la operación cotidiana, además de los datos de 15 días, por inconsistencias en la información. De esta forma, el análisis presentado se basa en la información de 210 días de operación (78 % del total registrado). El periodo de monitoreo ocurrió durante la emergencia sanitaria por la pandemia del virus SARS-CoV-2, durante la cual la demanda en los sistemas de transporte público se redujo como consecuencia de las restricciones y el confinamiento.

<sup>7</sup> Didcom Canlogger Guard® V1.0, Didcom brochure, <https://didcom.com.mx/wp-content/uploads/2016/12/CLG-ficha-t%C3%A9cnica.pdf>

## RESULTADOS DEL MONITOREO

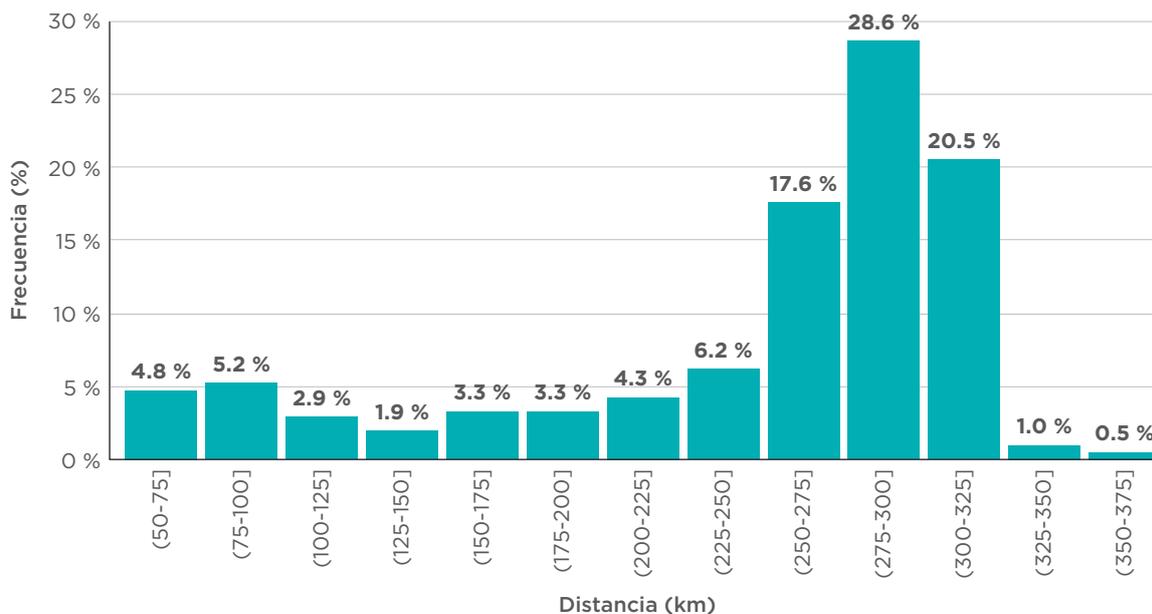
Se presentan los resultados del monitoreo realizado mediante equipo de telemetría de un autobús articulado eléctrico, desplegado en el Sistema Metrobús de la Ciudad de México. Se analizan diversos parámetros operacionales y de desempeño, tales como distancia recorrida, velocidad, estado de carga (SoC, *State of Charge*), consumo de energía por kilómetro y regeneración de energía, entre otros.

### DISTANCIA DIARIA RECORRIDA

Durante el periodo analizado, el promedio de la distancia diaria recorrida fue de  $246.7 \pm 10.4$  km, con un intervalo de confianza de 95 %, mientras que la mediana es de 277.7 km. Esto representa la operación de circular al menos 6 veces el circuito más largo de la línea. La distancia máxima recorrida durante una jornada fue de 373.2 km (19/06/2021) en la cual, el estado de carga descendió 70 %, siendo el siguiente valor máximo de 335 km (03/07/2021).

Como se observa en el histograma para la distancia diaria recorrida, figura 2, el 32 % de los días analizados el vehículo recorrió una distancia menor a 250 km, el 66.5 % recorrió distancias entre 250 km y 325 km, y 1.5 % una distancia superior a 325 km. El rango entre 275 km y 300 km acumula el 28.6 % de la muestra.

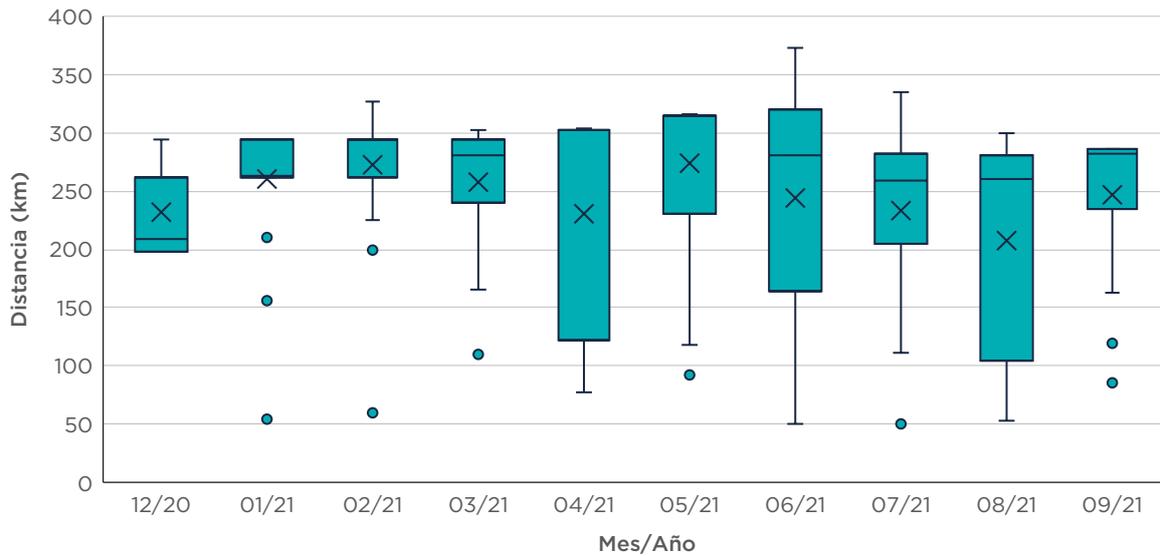
Considerando las características de la línea en la que se evaluó el autobús, a partir de la información de distancia recorrida, la mayor cantidad de datos recolectados son representativos de la operación regular del autobús en servicio y corresponden a las condiciones operacionales y ambientales de mayor exigencia presentes en este servicio.



**Figura 2.** Histograma de distancia diaria recorrida.

Con respecto a la distribución de las distancias diarias recorridas durante cada mes, en la figura 3 se presenta un diagrama de caja, en el cual se observa que durante 6 meses, diciembre de 2020, abril y de junio a septiembre de 2021, el promedio agregado mensual se encuentra en el rango entre 200 km y 250 km, mientras que durante 4 meses, enero a marzo y mayo de 2021, se encuentra en el rango entre 250 km y 300 km. En cuanto a la dispersión de datos, podemos ver que durante la mayor parte del periodo monitoreado (7/10 meses) los datos se localizan en un rango menor a 100 km, mientras que durante 3 meses se observa una dispersión con amplitud entre 150 km y 200 km.

Durante los últimos meses del monitoreo (entre junio y septiembre), el vehículo monitoreado se empleó para la capacitación de operadores, previo a la llegada de la flota adicional (9 autobuses). La forma de conducción durante este proceso puede estar asociada a los cambios de patrones observados en algunas de las variables analizadas, así como en el incremento en la dispersión de los datos registrados durante este periodo.



**Figura 3.** Diagrama de caja: distancia promedio diaria recorrida.

## CONSUMO DE ENERGÍA NETA

El consumo de energía observado depende de las características técnicas del vehículo y de los parámetros operacionales. Entre las características técnicas se incluyen: la capacidad del banco de baterías, la potencia del motor y el peso del vehículo, entre otros; mientras que los parámetros operacionales consideran la distancia recorrida, la velocidad, la carga de pasajeros transportados, el uso de accesorios, las características de la ruta y el estilo de conducción, entre otros.

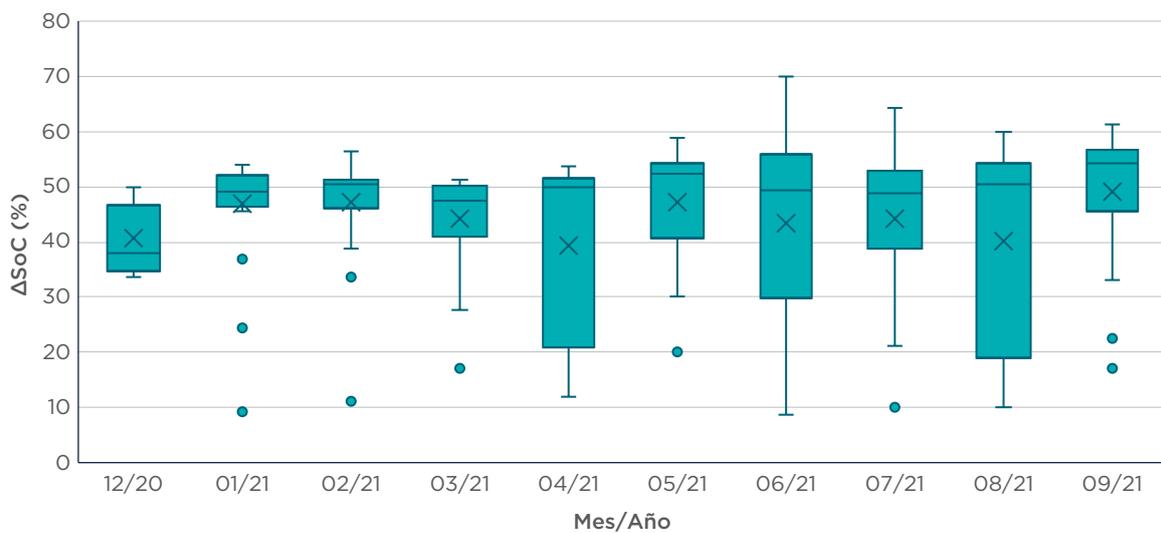
El consumo de energía se puede determinar mediante la variación del estado de carga (SoC) y la capacidad total del banco de baterías, lo que nos permite calcular la energía neta consumida. En este análisis se consideró una capacidad absoluta del banco de baterías de 563.83 kWh para determinar la energía neta consumida a partir de las diferencias registradas durante cada jornada en el estado de carga.

Debido a la pérdida gradual de capacidad o degradación de las baterías, para conocer la energía neta consumida a lo largo del tiempo será necesario relacionar la información de energía consumida con los datos de recarga de energía, o bien, determinar periódicamente la capacidad real de las baterías.

Durante el periodo de evaluación, el promedio de la diferencia entre el estado de carga inicial y el final,  $\Delta\text{SoC}$ , fue del  $44.1 \pm 1.9\%$  que, asumiendo 100 % del estado de salud de la batería (capacidad actual igual a capacidad inicial), corresponde a un consumo de energía de aproximadamente  $250.3 \pm 10.6$  kWh,

con un intervalo de confianza del 95 %. La mediana fue de 49.6 %, equivalente a 280.8 kWh. La menor diferencia en el periodo analizado fue de 8.8 % (49.6 kWh), mientras que la mayor fue de 70 % (394.7 kWh).

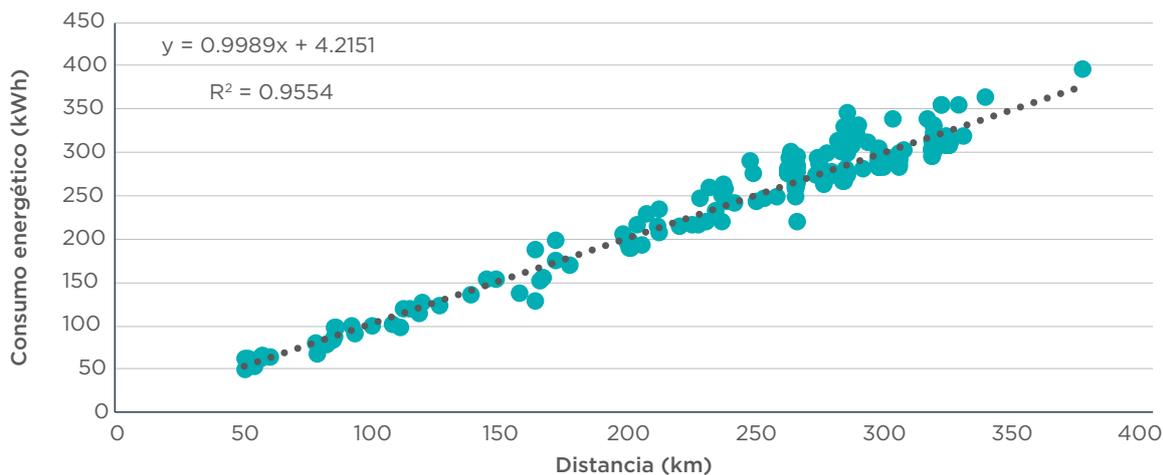
El diagrama de caja para la diferencia entre el estado de carga inicial y el final,  $\Delta\text{SoC}$ , figura 4, muestra que en todos los meses el valor promedio se ubica entre 40 % y 50 % de descarga. La dispersión de los valores es del orden de 10 % en la mayor parte de los meses evaluados (7/10 meses), mientras que en los 3 meses restantes se presentan dispersiones de entre 30 % y 40 % de descarga. Estos coinciden con los meses con mayor dispersión en distancia recorrida diaria presentados en la figura 3.



**Figura 4.** Diagrama de caja: consumo de energía ( $\Delta\text{SoC}$ ).

### RELACIÓN CONSUMO DE ENERGÍA VS DISTANCIA RECORRIDA

Al representar el consumo de energía consumida (kWh) contra la distancia diaria recorrida (km), figura 5, encontramos que existe una correlación directamente proporcional que se puede ajustar mediante una regresión lineal, cuya pendiente es positiva y podría interpretarse como una primera aproximación al consumo energético promedio por kilómetro recorrido. Para los datos analizados en el periodo de monitoreo, dicha pendiente adquiere un valor de 0.9989 kWh/km, aun cuando los datos son más dispersos en distancias mayores a 200 km el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) adquiere un valor de 0.9554.

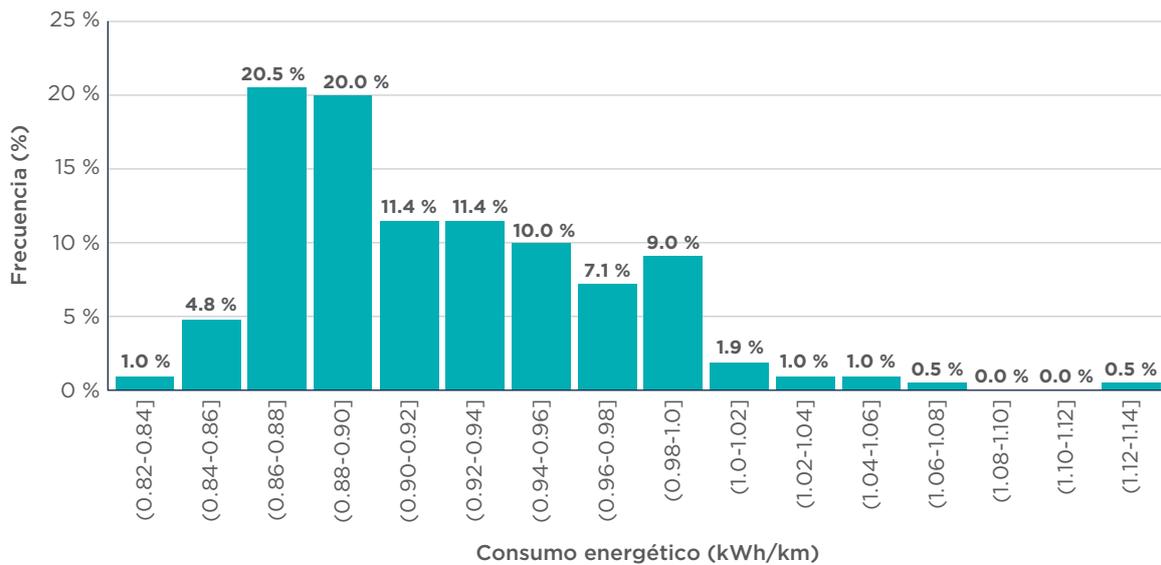


**Figura 5.** Relación de consumo de energía vs distancia diaria recorrida.

### CONSUMO DE ENERGÍA POR KILÓMETRO RECORRIDO

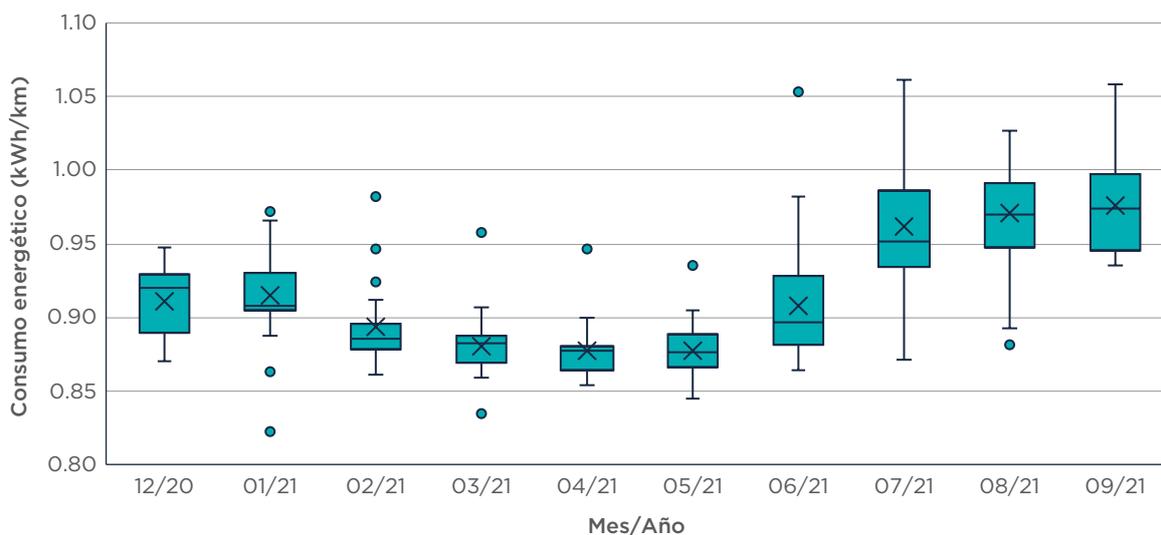
Cuando analizamos el consumo de energía por kilómetro recorrido, encontramos que el consumo promedio durante el periodo de prueba es de  $0.92 \pm 0.0068$  kWh/km, con un intervalo de confianza de 95 %. La mediana tiene un valor de 0.90 kWh/km. El rango para los datos evaluados abarca desde 0.82 kWh/km, como mínimo, hasta un máximo de 1.14 kWh/km.

En el histograma de la figura 6 se observa que el 6 % de los datos analizados presentan un consumo de energía por kilómetro recorrido menor a 0.86 kWh/km, el 40 % presenta un consumo entre 0.86 y 0.90 kWh/km, otro 49 % está agrupado en valores entre 0.9 y 1.0 kWh/km y el 5 % restante presenta consumos superiores a 1.0 kWh/km.



**Figura 6.** Histograma de consumo energético por kilómetro recorrido.

En el diagrama de cajas, figura 7, se puede observar que el consumo energético por kilómetro recorrido se mantuvo entre 0.90 y 0.95 kWh/km durante los primeros 2 meses del periodo de evaluación. Los siguientes 4 meses, de febrero a mayo, el consumo por kilómetro fue menor, manteniéndose por debajo de los 0.90 kWh/km, con muy baja dispersión en los datos y, en el periodo de junio a septiembre, el consumo energético por kilómetro recorrido aumentó gradualmente hasta 0.98 kWh/km. Además de incrementarse el consumo, durante este periodo se presenta la mayor dispersión de datos, con amplitudes superiores a 0.05 kWh/km.



**Figura 7.** Diagrama de caja de consumo energético por kilómetro recorrido.

## VELOCIDAD MEDIA DIARIA

La velocidad media diaria del autobús se mantuvo en un rango entre 10 y 16 km/h durante el periodo de prueba, obteniéndose un promedio de  $13.81 \pm 0.32$  km/h, con un intervalo de confianza de 95 % y una mediana de 14.65 km/h. Cabe señalar que esta es la velocidad media de toda la operación diaria y considera los periodos en ralentí del vehículo (V-O), que se analizan más adelante. De acuerdo con las características de la línea en la que operó el autobús durante el monitoreo, este circuló principalmente dentro de un carril confinado para el servicio BRT, deteniéndose en los cruces semaforizados y en las estaciones distribuidas a una distancia aproximada de 500 m a lo largo de la línea.

Como se aprecia en el diagrama de caja para este parámetro operativo, durante los primeros dos meses del monitoreo, se registraron velocidades entre 12 y 14 km/h. Posteriormente, durante 4 meses, entre febrero y mayo, la velocidad media diaria se mantuvo alrededor de 15 km/h, con poca dispersión en los datos, y a partir de junio se presentan velocidades más bajas, así como mayor dispersión en los datos.

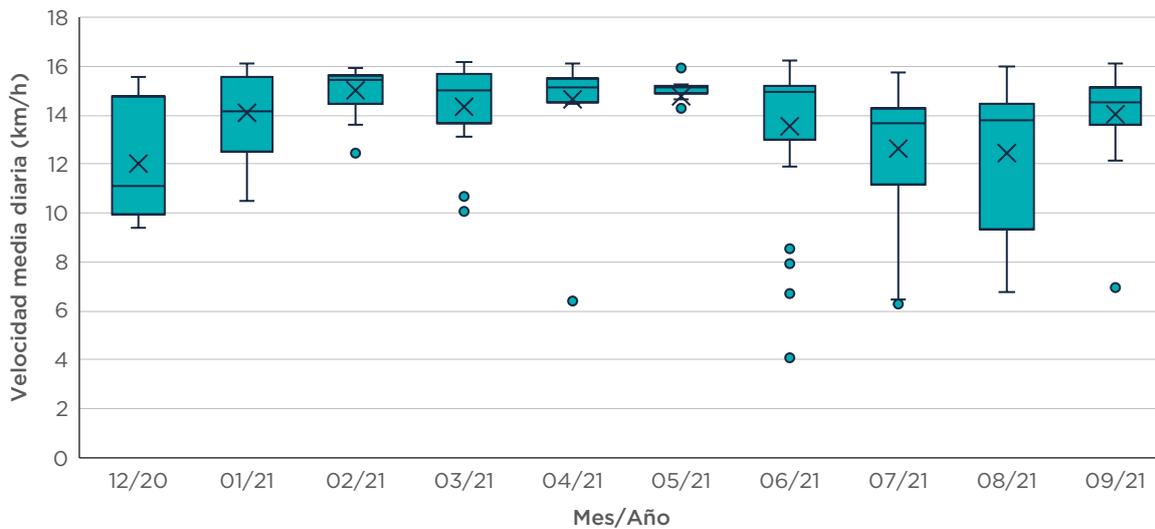


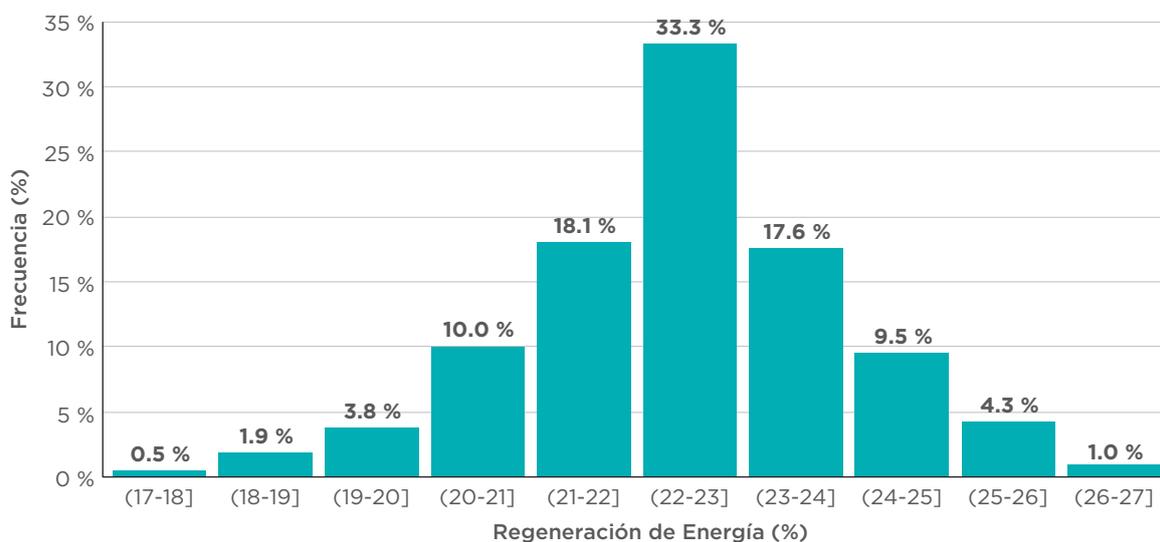
Figura 8. Diagrama de caja: velocidad media diaria.

## REGENERACIÓN DE ENERGÍA

Los vehículos eléctricos disponen de un sistema de regeneración de energía a través del frenado, esto se conoce como frenado regenerativo. Durante este proceso el motor cambia su modo de operación para funcionar como un generador de energía, la cual se aprovecha para recargar las baterías. La

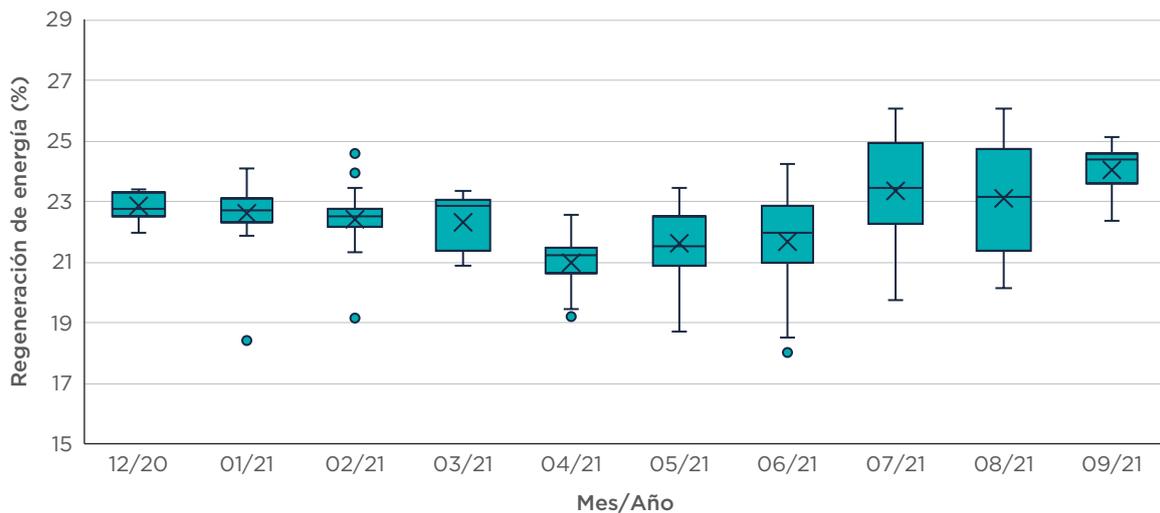
cantidad de energía que se puede regenerar mediante este proceso depende de la forma en la que se opera el vehículo y de las características de la ruta en la que se opera, debido a la frecuencia de situaciones de aceleración y frenado, así como de las características técnicas del sistema regenerativo. La energía regenerada mediante este proceso durante el periodo de monitoreo osciló en un rango entre 15.9 % y 26.1 %, con respecto a la energía total consumida. El promedio de regeneración fue de  $22.4 \pm 0.21$  %, con un intervalo de confianza de 95 %, y la mediana de 22.5 %.

Como se observa en el histograma para este parámetro, figura 9, para 33.3 % de los datos analizados, la regeneración fue de entre 22 % y 23 %, 18.1 % entre 21 y 22 % y 17.6 % entre 23 y 24 %. De esta forma, entre el 21 % y 24 % de regeneración se encuentra en el 69 % de la muestra. Por otra parte, 6.2 % presentó regeneraciones menores al 20 % y únicamente 5.3 % de los datos analizados presentó regeneraciones mayores al 25 %.



**Figura 9.** Histograma: regeneración de energía.

El diagrama de cajas para la energía regenerada se presenta en la figura 10, donde se observa que durante los primeros cinco meses de la evaluación la regeneración desciende gradualmente de 23 % a 21 %, manteniendo un comportamiento con poca dispersión. A partir de mayo y hasta septiembre, la regeneración aumenta gradualmente, superando 23 % de energía regenerada durante los 3 meses finales. Durante los últimos cinco meses de monitoreo, la dispersión de datos es mayor, siendo agosto el mes con mayor dispersión, con variaciones de casi 4 puntos porcentuales.



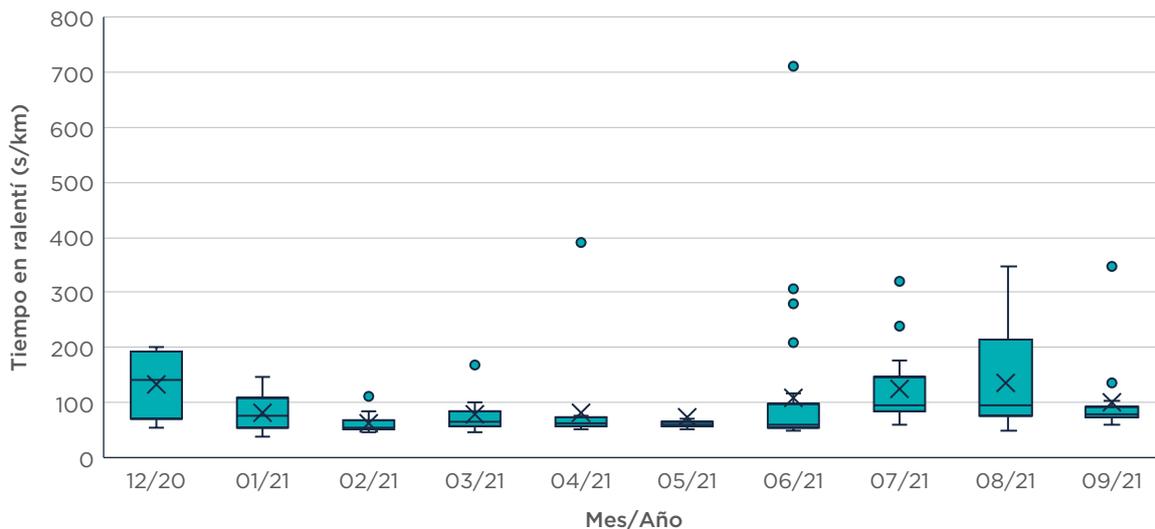
**Figura 10.** Diagrama de caja: regeneración de energía.

### TIEMPO EN RALENTÍ

Ralentí es el régimen durante el cual el vehículo se encuentra encendido y operando, pero está detenido. Durante este tiempo, los sistemas y accesorios consumen energía, pero el vehículo no se está desplazando. Operativamente es importante reducir los periodos en este régimen, sin embargo, son ineludibles: corresponden a los intervalos de ascenso y descenso de pasajeros, así como a tiempos de espera en semáforos y terminales.

Durante el periodo de monitoreo, los periodos en régimen ralentí presentan un promedio de  $97.35 \pm 10.8$  s/km, con un intervalo de confianza de 95 %, y una mediana de 70.34 s/km. El valor mínimo durante todo el monitoreo fue de 37.99 s/km y el máximo de 710.21 s/km. Como se observa en el diagrama de cajas para este parámetro, este valor máximo debe ser discriminado, dado que es inconsistente con el comportamiento acumulado registrado durante todo el periodo analizado. El rango en el que varía este parámetro durante todo el periodo monitoreado se mantiene entre 50 y 200 s/km.

El diagrama de cajas para el tiempo en ralentí se presenta en la figura 11, donde se observa que durante 7 meses el promedio mensual fue inferior a 100 s/km, en 5 de los cuales los datos se concentran en rangos de muy baja dispersión. Durante 3 meses, el promedio es superior a 100 s/km, para los cuales los datos presentan mayor dispersión con variaciones mayores a 50 s/km.



**Figura 11.** Diagrama de caja: tiempo en ralentí.

Si consideramos que una jornada de operación cotidiana dura entre 18 y 21 horas, durante las cuales los autobuses circulan en promedio 246.7 km, la relación de tiempo en ralentí indica que, en promedio, por cada kilómetro recorrido el autobús está detenido 97.35 segundos, lo que significa 24 016 segundos al día. Esto equivale a 6.67 horas al día, lo que representa entre 32 % y 37 % del tiempo de operación diaria.

En la tabla 2 se presentan algunos parámetros estadísticos como son mediana, promedio con intervalo de confianza del 95 %, valor mínimo y valor máximo, registrados para los diferentes parámetros técnicos y operativos previamente discutidos.

**Tabla 2.** Parámetros estadísticos por día de operación de las variables analizadas.

Parámetro	Unidades	Mediana	Promedio	Mínimo	Máximo
Distancia diaria recorrida	km	277.7	246.7 ± 10.4	50.1	373.2
ΔSoC por día de operación	%	49.6	44.1 ± 1.9	8.8	70.0
Consumo de energía neta diario	kWh	280.8	250.3 ± 10.6	49.6	394.7
Consumo de energía por kilómetro	kWh/km	0.90	0.92 ± 0.0068	0.82	1.14
Velocidad media diaria	km/h	14.65	13.81 ± 0.32	4.06	16.26
Regeneración de energía por día	%	22.5	22.4 ± 0.21	15.9	26.1
Tiempo en ralentí	s/km	70.34	97.35 ± 10.8	37.99	710.21

## PRUEBAS DE LASTRE

Debido a su importancia e influencia en el comportamiento del consumo de energía, durante marzo de 2022 se llevó a cabo una serie de pruebas de desempeño con carga controlada, como complemento al periodo de monitoreo, a razón de generar una correlación entre el consumo de energía y la carga transportada ya que no se dispuso de registros de carga transportada durante el periodo de monitoreo.

Se generó un protocolo de pruebas y, con base en la información recolectada entre diciembre de 2020 y septiembre de 2021, se establecieron algunos de los parámetros operacionales, así como los escenarios de carga. Previo a la ejecución de las pruebas con carga controlada, se verificó mediante una preinspección que el vehículo se encontrara en condiciones adecuadas para el desarrollo de estas. Durante este proceso se verificaron los sistemas de suspensión, neumáticos, tren motriz y sistema eléctrico, sin registrarse ninguna falla.

Adicionalmente, la empresa operadora asistida por el fabricante, llevó a cabo el procedimiento para conocer el Estado de Salud (SoH, *State of Health*) del banco de baterías. A través de este se determinó que, tras un año y medio de operación (~75 000 km), el estado de salud del banco de baterías es de 90 % de su capacidad inicial. La consistencia de las celdas es buena y el desvanecimiento del SoH cumple con las expectativas de acuerdo con la curva de desvanecimiento esperada por el fabricante.

De acuerdo con el protocolo desarrollado, se realizó el ejercicio para cinco escenarios de carga, mismos que se presentan en la tabla 3. Por variaciones en el peso del material que se empleó para simular la carga de los pasajeros transportados (costales de arena y bidones rellenos con agua), se presentaron diferencias entre la carga nominal y la carga real. En la misma tabla se presenta la carga agregada en cada escenario, así como su correspondencia con la carga real transportada y con la cantidad de pasajeros equivalentes para cada escenario, tomando en cuenta un promedio de 63.75 kg por pasajero.

**Tabla 3.** Escenarios de carga nominal y carga real para las pruebas.

Carga nominal (%)	Peso total (kg)	Carga (kg)	Porcentaje de la capacidad de carga (%)	Pasajeros equivalentes
0	17 660	0	0	0
25	21 120	3 460	34.3	54
50	23 260	5 600	54.9	87
75	25 960	8 300	81.3	130
100	28 340	10 680	104.9	167

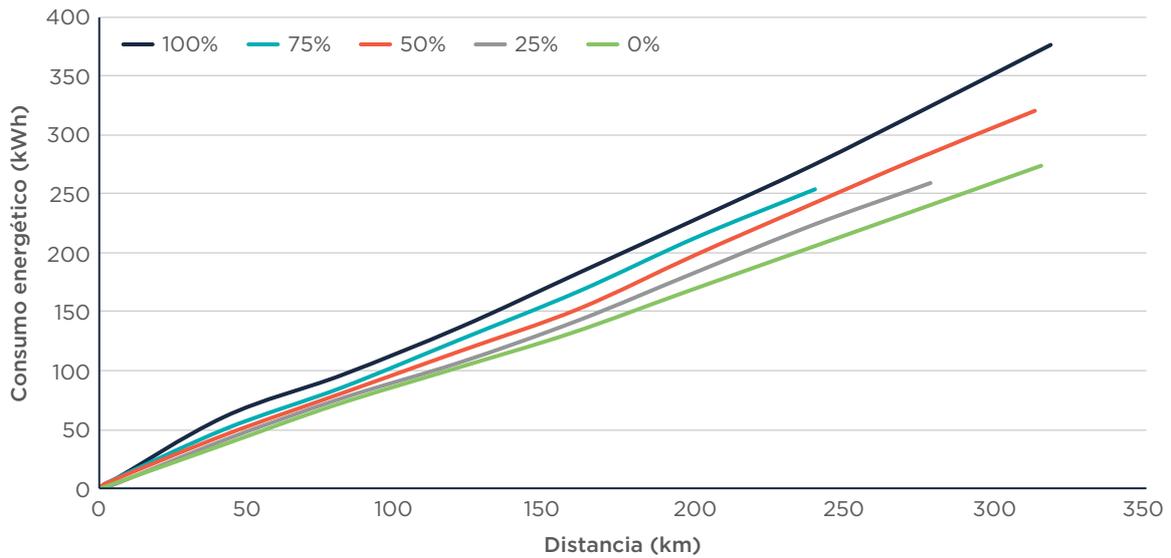
La columna Peso total (kg) en la tabla 3 corresponde al peso del vehículo vacío más la carga añadida para cada escenario, mientras que la columna Carga (kg) corresponde al peso adicional añadido al vehículo para cada escenario. De esta forma, de acuerdo con la medición, el vehículo vacío tiene un peso de 17 660 kg. Para el primer escenario se agregó una carga de 3 460 kg, equivalente a transportar 54 pasajeros, alcanzándose un peso total de 21 120 kg y así sucesivamente, hasta añadir una carga adicional de 10 680 kg, equivalente a transportar 167 pasajeros, para alcanzar un peso total de 28 340 kg.

Durante el desarrollo de las pruebas, además del monitoreo mediante el equipo de telemetría, se registraron manualmente algunos parámetros operativos, como la hora y lectura de odómetro. De igual forma, se registró el estado de carga en el tablero al inicio de cada ciclo de manejo y al cierre de cada jornada. Estos se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Resumen de la operación durante las pruebas con carga controlada.

Carga nominal (%)	Fecha	Distancia (km)	SoC <sub>i</sub> (%)	SoC <sub>f</sub> (%)	ΔSoC
0	21/03/22	319.96	98	44	54
25	19/03/22	278.16	99	48	51
50	18/03/22	316.36	99	36	63
75	17/03/22	242.02	99	49	50
100	16/03/22	321.61	100	26	74

A partir de las diferencias en el estado de carga y considerando el estado determinado de salud de las baterías, previo al desarrollo de las pruebas (90 %), así como su capacidad corregida (507.45 kWh), se generan las curvas de consumo energético vs distancia recorrida, las cuales se presentan en la figura 12. Como es de esperar, conforme aumenta la carga transportada, mayor será la energía requerida para recorrer la misma distancia.

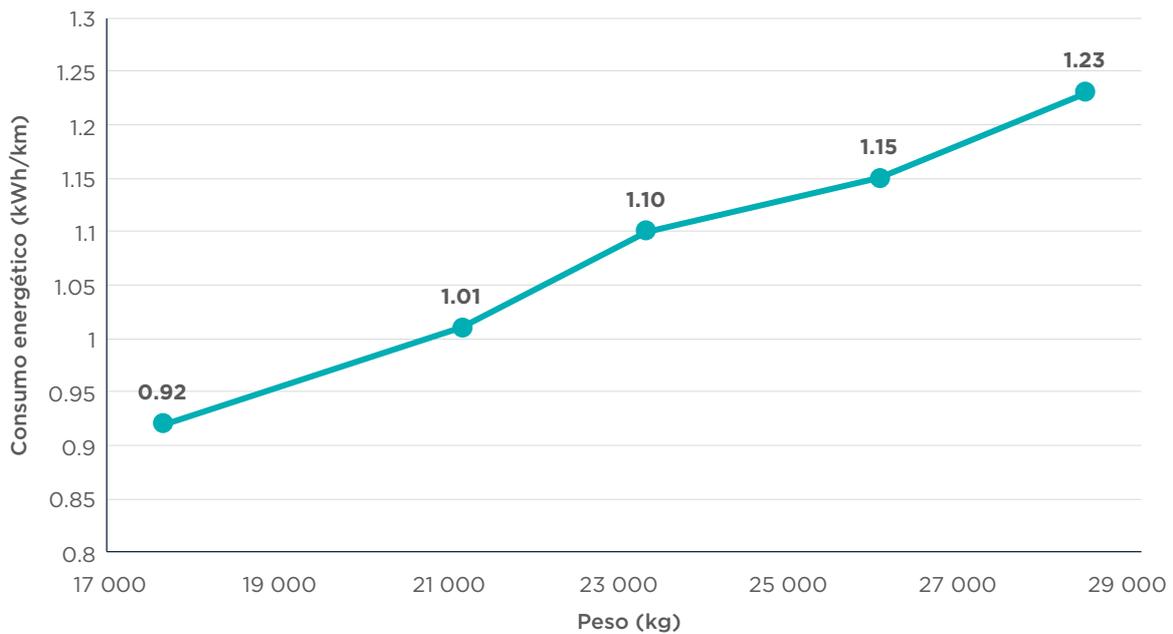


**Figura 12.** Consumo energético (kWh) vs distancia para cada escenario de carga.

A partir de los valores registrados y de los datos monitoreados mediante telemetría, se determinó el consumo energético por kilómetro recorrido para cada escenario de carga. Estos se presentan en la tabla 5, así como en la figura 13.

**Tabla 5.** Consumo energético medido para cada escenario de carga.

Carga nominal (%)	Porcentaje de la capacidad de carga (%)	Peso bruto vehicular (kg)	Consumo energético (kWh/km)
0	0	17 660	0.92
25	34.3	21 120	1.01
50	54.9	23 260	1.10
75	81.3	25 960	1.15
100	104.9	28 340	1.23



**Figura 13.** Consumo energético medido para cada escenario de carga.

Como se observa, los consumos calculados por medio de los datos registrados durante la serie de pruebas y con cargas conocidas, son superiores a los registrados durante el periodo de monitoreo analizado. Se alcanzaron consumos de hasta 1.23 kWh/km, con carga total contra un máximo registrado en el periodo de monitoreo de 1.14 kWh/km. Considerando que el entorno de las pruebas fue supervisado y controlado, estimamos que los consumos obtenidos mediante este proceso son más representativos sobre la operación real del vehículo, cuyo desempeño energético oscila en un rango entre 0.92 y 1.23 kWh/km.

Considerando los resultados obtenidos para el consumo de energía y la equivalencia de pasajeros transportados en cada escenario, encontramos que el consumo incrementa en 0.092 kWh/km por cada 50 pasajeros equivalentes adicionales transportados.

### INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE RECARGA

Durante el periodo de pruebas con carga se obtuvo acceso, a través de la empresa operadora, a un resumen de la información registrada por medio de la plataforma del sistema de recarga, mediante la cual podemos conocer la energía suministrada desde el cargador y los periodos de carga. Esta información se presenta en la tabla 6.

De acuerdo con los datos de energía suministrada y los periodos registrados de carga, se observa que la velocidad promedio de carga es de aproximadamente 2 kW/min, valor consistente en cuatro de las cinco observaciones. Llama la atención la duración del último periodo de carga, por ser muy superior al resto. Esto puede deberse a que al finalizar las pruebas, el autobús no iba a continuar operando y, aunque pudo haber concluido su carga antes, no fue sino hasta esa hora que se desconectó del cargador.

**Tabla 6.** Información de recarga del operador.

Fecha	Carga (kWh)	Hora inicio carga	Hora fin carga	Tiempo recarga	Velocidad carga (kW/min)
16/03/22	368.59	2:33	5:37	3:04	2.00
17/03/22	258.24	0:00	2:10	2:10	1.98
18/03/22	324.43	2:11	4:54	2:43	1.99
19/03/22	267.31	23:28	1:43	2:11	2.04
21/03/22	282.30	1:53	6:31	4:38	1.01

En la tabla 7 se compara la energía consumida, de acuerdo con el análisis realizado con datos de telemetría, contra la energía suministrada por el cargador para alcanzar la carga completa. En todos los registros se encuentra una diferencia de entre 1.5 % y 3.3 %, siendo mayor la energía alimentada que la consumida. Esto podría relacionarse con la eficiencia de la transferencia de energía entre el cargador y el banco de baterías, sin embargo, se requiere más información y datos para concluir sobre estos valores. Por inconsistencias en el registro, no se presenta el valor para el escenario de carga completa.

**Tabla 7.** Comparación consumo energético y energía alimentada por el cargador.

Carga nominal (%)	Consumo de energía autobús (kWh)	Energía suministrada por el cargador (kWh)	Diferencia
0	274	282.3	3.03 %
25	258.8	267.31	3.29 %
50	319.7	324.43	1.48 %
75	253.7	258.24	1.79 %

## CONCLUSIONES

Para cumplir con su meta de descarbonización, la Ciudad de México ha iniciado la transición hacia la electromovilidad. Entre muchas acciones se ha establecido el compromiso de que, en el año 2024, una línea de Metrobús sea cero emisiones. A partir de 2020, Metrobús, mediante el apoyo de la asistencia técnica internacional de diversas iniciativas, junto con inversionistas y fabricantes, ha llevado a cabo diferentes pilotos en condiciones reales de operación. El objetivo es conocer las nuevas tecnologías de autobuses eléctricos a baterías y poder evaluar su desempeño, así como familiarizarse con su operación cotidiana.

Este reporte analiza el desempeño y consumo de energía de un autobús articulado eléctrico durante un periodo de 10 meses. Haciendo uso de equipos de telemetría, se monitoreó la operación diaria del autobús, registrando una gran cantidad de parámetros técnicos y operativos que nos permiten caracterizar el desempeño operacional del vehículo.

Como se puede ver a lo largo del análisis específico para cada una de las variables evaluadas, el autobús cumplió con los requerimientos de operación, circulando entre 250 km y 325 km durante dos terceras partes del periodo de monitoreo. Durante el 99 % del este periodo, el consumo de energía por kilómetro recorrido se mantuvo en un rango entre 0.86 y 1.0 kWh/km. De igual forma, la energía regenerada mediante el sistema de frenado se mantuvo en un rango entre 21 % y 24 %, equivalente a aproximadamente 130 kWh al día.

Los parámetros operacionales influyen directamente en el desempeño de los vehículos eléctricos, esto es, la velocidad, el tiempo en régimen ralentí y el modo de frenado, así como el modo de conducción y el ciclo de manejo. Por ello existen áreas de oportunidad para mejorar el desempeño energético de los autobuses eléctricos, a través de mecanismos de capacitación a los operadores, así como de la optimización de rutas y servicios.

A través de la evaluación con cargas controladas, se determinaron las diferencias en el consumo por kilómetro para diferentes escenarios, los cuales abarcaron y superaron la capacidad de la carga transportada sin incurrir en ningún riesgo, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. De acuerdo con el análisis, el consumo del vehículo en vacío fue de 0.92 kWh/km, mientras que al evaluar con un 105 % de la capacidad máxima, el consumo ascendió a 1.23 kWh/km, lo cual sugiere que, durante el periodo de



monitoreo, la ocupación del vehículo fue baja, en consistencia con el periodo de confinamiento debido a la emergencia sanitaria por SARS-CoV-2. Por esto se recomienda emplear como referencia los consumos determinados mediante la prueba con cargas controladas.

Finalmente, el análisis de energía consumida por el autobús y suministrada por los cargadores presentó diferencias entre -2 % y 3.3 %. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis más profundo y con una muestra más amplia, ya que cinco valores de datos no son suficientes para obtener información representativamente válida.

## CONTACTO

zebra@theicct.org  
zebra@c40.org



SOCIO DE APOYO



AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES