



## Consumo energético de autobuses eléctricos articulados para distintos niveles de carga en el BRT de 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, y César Serrano. 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>METROBÚS LÍNEA 3</b> .....	<b>3</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS</b> .....	<b>5</b>
Preinspección.....	5
Lastrado y pesaje .....	8
Pruebas de consumo de energía en ruta.....	8
<b>DESARROLLO DE PRUEBAS DE CONSUMO ENERGÉTICO</b> .....	<b>12</b>
Preinspección.....	13
Lastrado y pesaje .....	15
Pruebas de consumo de energía en ruta.....	17
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>21</b>

## INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México se ha propuesto como objetivo alcanzar la neutralidad en carbono en 2050. Esta es una meta condicionada a apoyos financieros y cambios estructurales en los diferentes sectores, y no es la excepción para el sector transporte, que, para lograr el objetivo, requiere una mayor proporción de viajes no motorizados y un cambio tecnológico hacia la electrificación de vehículos y flotas.

Durante la presente administración (2018-2024), la Ciudad de México ha avanzado en movilidad eléctrica, estableciendo compromisos tangibles a través de instrumentos como el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 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 presenta como meta reducir en 30 % las emisiones de contaminantes criterio del sector a 2024. Adicionalmente, la Ciudad de México es signataria de la Declaración de C40 por Calles Verdes y Saludables<sup>3</sup>, en la cual se ha comprometido a que, a partir de 2025, todos los autobuses que sean adquiridos sean cero emisiones.

Entre las acciones más destacadas en electromovilidad se encuentran: el compromiso de implementar cuatro líneas de Cablebús, de las cuales actualmente hay dos operando; el incremento de la red de trolebuses y la adquisición de 500 unidades para este sistema, de las cuales 193 se obtuvieron entre 2019 y 2020; y finalmente, la creación de una línea de Metrobús cero emisiones, que operará con autobuses articulados eléctricos.

Metrobús, el Sistema BRT de la Ciudad de México<sup>4</sup>, ha comenzado su transición hacia la electromovilidad, evaluando autobuses de diferentes fabricantes y tipologías en condiciones reales de operación, de acuerdo con las características de cada una de sus líneas.


La experiencia en la Línea 3, a partir de septiembre de 2020, permitió que, tras la prueba y evaluación de un vehículo durante casi un año, se adquirieran nueve unidades articuladas eléctricas en 2021. Tras su puesta en operación, en agosto de 2021, se ha ratificado que la renovación del resto de la flota que

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/>

4 Pagina web "Metrobus", <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/>



opera en esta línea sea eléctrica, lo que corresponde a la sustitución de 51 autobuses en 2022 y 12 autobuses antes de 2028, de acuerdo con las reglas de operación y calendarios de renovación de flota de este sistema de transporte.

Esta iniciativa de electromovilidad ha sido posible gracias a la colaboración de diversos actores, tanto públicos como privados, que han logrado superar las barreras financieras, técnicas y operativas con un objetivo común. El Gobierno de la Ciudad de México, a través de la Secretaría de Movilidad (SEMOVI) y el Organismo Público Descentralizado, Metrobús; el fabricante de autobuses, Yutong; la empresa energética Engie, ahora VEMO, que invirtió en la primera unidad piloto y desde la que se desarrolló y proveyó la infraestructura de recarga inicial; y MobilityADO, a través de la empresa operadora MIVSA, concesionaria de la Línea 3 de Metrobús.

Mediante un novedoso esquema de adquisición/financiamiento, los autobuses y la infraestructura de recarga son adquiridos por un socio privado y arrendados a Metrobús, a través de un fideicomiso público-privado. Este, a su vez, cede los vehículos en comodato a la empresa operadora para su explotación.

Este proyecto aportará experiencia y lecciones, tanto operativas, como técnicas y financieras, para replicar este esquema, o alguno similar, en otras líneas de Metrobús, así como en otros corredores de transporte en Ciudad de México. Así se crea el potencial de generar grandes beneficios ambientales para la población, tanto a nivel local como a nivel global. De acuerdo con las reglas de operación del Sistema Metrobús, se prevé que la renovación de autobuses alcance 508 vehículos en 2030<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> 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, <https://theicct.org/publication/mexico-latam-hdv-zebra-mar22/>

## METROBÚS LÍNEA 3

La Línea 3 de Metrobús inició su operación en febrero de 2011, dando servicio a lo largo de 17 kilómetros, en ambos sentidos, entre Tenayuca, al noroeste de la ciudad, y Etiopía-Plaza de la Transparencia, al centro-sur, circulando mayoritariamente por Avenida Vallejo y Eje 1 Poniente. Un recorrido relativamente plano que cuenta con una pendiente máxima de 6 grados. Originalmente contaba con cinco terminales, 33 estaciones y una flota de 54 autobuses articulados EURO V, atendiendo una demanda diaria de 120 000 pasajeros, que con el tiempo fue creciendo hasta los 205 000 pasajeros, para lo cual incrementó gradualmente su flota. En marzo de 2021, comenzó a operar una ampliación de esta línea hacia el sur de la ciudad, con la que se agregaron cuatro estaciones y una terminal, Pueblo de Santa Cruz Atoyac, alcanzando así 20.4 kilómetros de cobertura.



**Figura 1.** Detalle de ampliación de la Línea 3 de Metrobús (fuente: <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/L3>).

Para poder atender la demanda adicional asociada con la ampliación, en agosto de 2021 entraron en operación nueve autobuses eléctricos a batería (BEB), con las mismas dimensiones y capacidad de pasajeros que los autobuses a combustión que operan en esta línea.

De acuerdo con las reglas de renovación de flota de Metrobús, los 54 autobuses que constituyen la flota original debieron sustituirse en 2021. Sin embargo, para posibilitar la adquisición de autobuses eléctricos, este proceso se realiza en 2022 bajo un nuevo modelo de negocio. En 2030, se espera haber renovado el total de la flota de Línea 3, que actualmente corresponde a 72 unidades.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio es determinar las curvas de consumo energético de los autobuses articulados eléctricos que operan en la Línea 3 del Metrobús de la Ciudad de México. Esto se lleva a cabo simulando la operación cotidiana para diferentes niveles de carga en condiciones reales.

El vehículo a evaluar ha sido monitoreado a través de dispositivos de telemetría desde diciembre de 2020 y se dispone de información sobre su desempeño diario, a través del monitoreo y registro de una amplia serie de parámetros operativos. Sin embargo, es relevante poder correlacionar el desempeño en consumo energético con la carga que el vehículo transporta. El monitoreo con telemetría se realizó mediante la instalación de un dispositivo *Canlogger Guard v1.0*<sup>6</sup>, conectado de forma no intrusiva, para tener acceso a la información del CAN Bus y convirtiendo los datos registrados al protocolo de comunicación SAE J-1939, para su interpretación y análisis.

El vehículo monitoreado es un autobús articulado eléctrico de 18 m, 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.

**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

<sup>6</sup> Ficha técnica: <https://didcom.com.mx/wp-content/uploads/2016/12/CLG-ficha-t%C3%A9cnica.pdf>

## DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

En 2021, el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés), elaboró un protocolo de pruebas específico, para evaluar el desempeño y el consumo energético de los autobuses eléctricos que operan en la Línea 3 de Metrobús en condiciones reales de operación. El protocolo describe las consideraciones técnicas, los equipos necesarios y los procedimientos, tanto para la preinspección del vehículo como para el desarrollo de las pruebas, así como los formatos asociados a cada proceso con especificaciones de la información que debe ser registrada.


### PREINSPECCIÓN

Antes de desarrollar las pruebas es necesario llevar a cabo una preinspección del vehículo. La finalidad es verificar que se encuentra en condiciones óptimas para la evaluación. Este procedimiento es realizado por la empresa operadora y el fabricante, acompañados por Metrobús y el ICCT.

La preinspección incluye la verificación de los siguientes sistemas:

- **Tren motriz y sistema eléctrico.** Se realiza al ejecutar un diagnóstico integral del tren motriz y de las baterías, así como al determinar el estado de los equipos auxiliares. Para ello, se requiere realizar un diagnóstico mediante escáner, verificar que no se presente ninguna señal de falla y generar un reporte del diagnóstico.
- **Suspensión.** Se hace al llevar a cabo una inspección visual del sistema de suspensión, verificando que no se presente ninguna falla evidente de acuerdo con los procedimientos de la empresa operadora, así como al documentar este procedimiento. Es deseable verificar la alineación del vehículo.
- **Neumáticos.** Se lleva a cabo al determinar y registrar el estado de los neumáticos, a través de la medición de profundidad del labrado, de acuerdo con los procedimientos de la empresa operadora.
- **Recarga.** Se realiza al ejecutar un diagnóstico del sistema de recarga del vehículo y al elaborar el informe correspondiente.





Antes de realizar las pruebas es necesario determinar el Estado de Salud de las baterías (SoH - *State of Health*), para conocer el estado de las baterías y su capacidad real.

El procedimiento para la determinación del Estado de Salud consiste en:

- Cargar el autobús hasta que el Estado de Carga (SoC) alcanza el 100 %.
- Operar el vehículo y descargar las baterías hasta un valor SoC menor a 5 %.
- Esperar durante 20 minutos.
- Cargar hasta la capacidad máxima, registrando la corriente y el voltaje asociados a la carga.

Obteniéndose estos valores, es posible conocer la capacidad real de las baterías mediante una serie de cálculos.

El formato propuesto para documentar el proceso de preinspección se presenta en la tabla 2. Este deberá entregarse junto con los reportes e informes de la verificación de los sistemas del vehículo. Se recomienda elaborar e incluir un registro fotográfico de todo el proceso.

**Tabla 2.** Formato de preinspección del vehículo.

Fecha		Ciudad	
Lugar		Hora	
No. del Motor del Vehículo (NI)		No. del Chasis del Vehículo (NI)	
Vehículo Marca		Referencia del Vehículo	
Lectura del Odómetro (km)		Empresa Operadora	
Inspección Tren Motriz Ejecutada por:		Serial del Escáner	
Inspección Sistema de Suspensión Ejecutada por:		Serial Equipo Alineación	
Inspección de Neumáticos Ejecutada por:		Detalle de los Equipos Usados para Inspección Neumáticos	
Inspección Sistema de Recarga Ejecutada por:		Serial Equipo de Inspección y Diagnóstico	
A continuación, incluya los parámetros solicitados y registrados por los sistemas de I&D del vehículo			
Parámetro	Unidad	Valor	Comentario
SOH	%		
Odómetro	km		
Número de Motores	---		
Número de Inversores	---		
Número de Baterías	---		
Profundidad Neumático 1	mm		
Profundidad Neumático 2	mm		
Profundidad Neumático 3	mm		
Profundidad Neumático 4	mm		
Profundidad Neumático 5	mm		
Profundidad Neumático 6	mm		
Profundidad Neumático 7	mm		
Profundidad Neumático 8	mm		
Profundidad Neumático 9	mm		
Profundidad Neumático 10	mm		
Tensión de Recarga	V		
Corriente de Recarga	Amp		
Potencia de Recarga	kW		
Camber	o		

## LASTRADO Y PESAJE

Tomando en cuenta las características del autobús y de acuerdo con la información del fabricante, el vehículo tiene un peso en vacío de 19 800 kg y un peso bruto vehicular máximo de 30 000 kg. Por lo tanto, su capacidad de carga es de 10 200 kg, lo que corresponde a 160 pasajeros de 63.75 kg en promedio.

La carga para el lastrado se simula con costales de arena o cemento para los pasajeros que se trasladan sentados (40 asientos) y con bidones conteniendo agua para los pasajeros que se trasladan de pie (120 sitios). Adicional a lo descrito en el protocolo, se modificaron los requerimientos, considerando que en el mercado nacional los costales de arena o cemento tienen un peso de 50 kilogramos y hay disponibilidad de bidones de 50 litros de capacidad.

De acuerdo con lo anterior, para cada carga nominal, se lastra y pesa cada eje del autobús, y se registran los valores por eje y lado del vehículo. Al llevar a cabo el lastrado se recomienda, en la medida de lo posible, distribuir homogéneamente la carga. La tabla 3 presenta los requerimientos de carga para cada escenario.

**Tabla 3.** Propuesta de lastrado del autobús.

Carga nominal (%)	Pasajeros equivalentes	Peso requerido (kg)	Costales requeridos	Bidones requeridos	Peso neto (kg)
0	0	0	0	0	0
25	40	2550	51	0	2550
50	80	5100	51	42	5070
75	120	7650	51	84	7590
100	160	10 200	51	126	10 110

## PRUEBAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN RUTA

Considerando las características operativas de la Línea 3 de Metrobús y con la intención de generar información representativa, para cada escenario de carga se recomienda circular al menos 300 km, simulando la operación cotidiana en ruta. Esto corresponde a realizar ocho veces el recorrido de la ruta más extensa de la Línea 3, Tenayuca-Pueblo Santa Cruz Atoyac-Tenayuca.

**Tabla 4.** Distancia y duración de cada prueba.

Ciclo	Distancia acumulada (km)	Duración acumulada (h)	Estaciones acumuladas
1	40	2.5	76
2	80	5	152
3	120	7.5	228
4	160	10	304
5	200	12.5	380
6	240	15	456
7	280	17.5	532
8	320	20	570

Con base en la duración acumulada de cada prueba y en las jornadas programadas de operación en el corredor, se diseñó el siguiente esquema de trabajo de la tabla 5 para cada jornada.

**Tabla 5.** Esquema operativo tentativo para cada jornada de pruebas.

Hora	Actividad	Ciclo
05:12	Inicio de recorrido	Ciclo 1
07:46	Inicio de recorrido	Ciclo 2
10:22	Inicio de recorrido	Ciclo 3
12:57	Inicio de recorrido	Ciclo 4
15:33	Inicio de recorrido	Ciclo 5
18:08	Inicio de recorrido	Ciclo 6
20:41	Inicio de recorrido	Ciclo 7
23:10	Inicio de recorrido	Ciclo 8
01:50	Regreso a patio	
03:00	Lastrado	

Para cada ciclo se debe detener el vehículo en las estaciones y abrir y cerrar puertas, simulando la operación en servicio.

Para no interferir con la operación y no confundir a los usuarios que esperan en las estaciones, se aconseja detener el vehículo y abrir puertas en un sitio donde no sea posible el ascenso de pasajeros. Por ejemplo, en la rampa de acceso a cada estación o antes de la plataforma de acoplamiento.

Además de abrir puertas, el vehículo deberá circular con las luces encendidas, encender las luces interiores de acuerdo con la programación habitual (hora del día), y con los sistemas auxiliares operando conforme a programación (información a usuarios, cámaras, banderas de destino y ruta).

Durante el recorrido, también se deben monitorear y registrar los parámetros descritos en el formato para pruebas en ruta, que se presenta en la tabla 6.

**Tabla 6.** Formato de recolección de información para pruebas en ruta.

Fecha										
Técnico de pruebas										
Operador (Conductor)										
Condición de carga (kilogramos)										
Peso en el eje delantero										
Peso en el eje intermedio										
Peso en el eje trasero										
Presión tanque aire comprimido (bar/psi)										
	INICIAL					FINAL				
	Hora	Tamb	H. Rel	Odóm	% Carga	Hora	Tamb	H. Rel	Odóm	% Carga
C1										
C2										
C3										
C4										
C5										
C6										
C7										
C8										
¿Algun testigo de fallo se activó durante la ruta? (si la respuesta es afirmativa, especificar cuál)										

Hora (hh:mm); Temperatura ambiente (°C); Humedad relativa (%); Lectura odómetro (kilómetros); Carga batería (%).

La temperatura ambiente y la humedad relativa se registran con un termohigrómetro, para verificar que las condiciones atmosféricas son semejantes entre cada prueba. Los cambios radicales en estos parámetros pueden provocar variaciones en el comportamiento de las baterías. En este proceso se empleó un termohigrómetro digital HTi, HT-86 ([www.xintest.com.cn](http://www.xintest.com.cn)), cuyas características técnicas se presentan en la tabla 7.

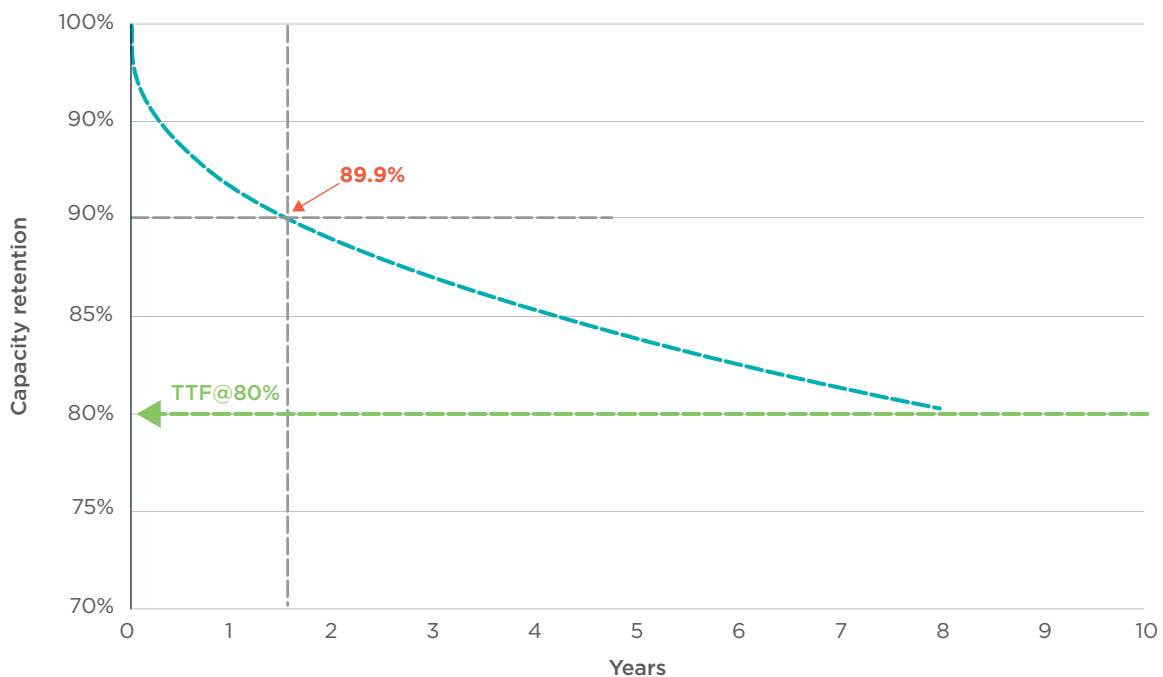
**Tabla 7.** Especificaciones técnicas del termohigrómetro.

Parámetro	Valores
Modelo	HT-86
Temperatura del punto de rocío	-20 °C ~ 80 °C
Temperatura de bulbo húmedo	0 °C ~ 80 °C
Resolución	0.01 % RH, 0.01 °C
Precisión de humedad	± 3 % RH (dentro de 25 °C, 20% ~ 80 % RH), ± 3,5 % RH (otros)
Precisión de temperatura	± 0.5 °C (25 °C), ± 0.8 °C (otro)
Tiempo de respuesta RH	10S (90 % 25 °C)
Entorno operativo	0 ~ 40 °C,

## DESARROLLO DE PRUEBAS DE CONSUMO ENERGÉTICO

Las pruebas se llevaron a cabo durante el mes de marzo de 2022. El día 14 en el patio de encierro “Júpiter” se efectuó la preinspección del vehículo y se recibió el material necesario para lastrar el vehículo. El día 15 se lastró gradualmente el autobús para cada escenario de carga y, simultáneamente, se llevó a cabo el proceso de pesaje. Las pruebas en ruta, con diferentes capacidades de carga en condiciones reales de operación, se realizaron entre el 16 y el 21 de marzo. Previo a la preinspección, el día 13 de marzo, la empresa operadora en conjunto con el fabricante llevaron a cabo el procedimiento para determinar el Estado de Salud de las baterías.

De acuerdo con el reporte que generó y emitió el fabricante, tras un año y medio de operación (~75,000 km), la capacidad real de las baterías es del 89.9 % del valor original (564 kWh), la consistencia de las celdas es buena y el desvanecimiento del SoH cumple con las expectativas, de acuerdo con la curva de desvanecimiento esperada, figura 2.



**Figura 2.** Estado de Salud (SoH) de las baterías y curva esperada de desvanecimiento de la capacidad. Fuente: Yutong 13/03/2022.

## PREINSPECCIÓN

La preinspección del autobús se llevó a cabo por personal del área de mantenimiento de la empresa operadora MIVSA. Personal de Metrobús, de la empresa fabricante y del ICCT acompañaron y supervisaron el proceso.

El técnico de la empresa operadora, responsable de verificar el estado de los sistemas del autobús, fue quien cubrió el formato propuesto de preinspección, al igual que el “Formato *Check List* Diagnóstico”, propio de la empresa, en el cual se verifican sistemas de: audio; seguridad; suspensión y dirección; transmisión y frenos; eléctrico; y carrocería, el cual fue avalado por el jefe de taller.

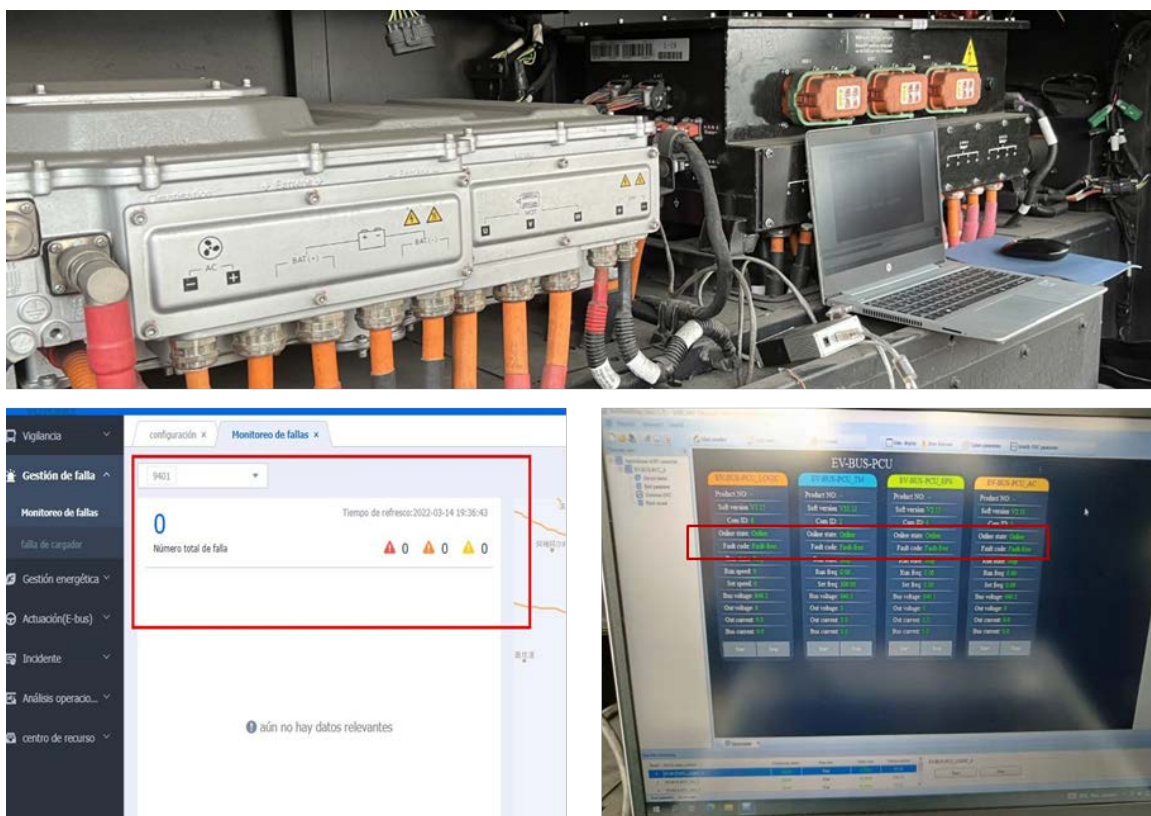
**Tabla 8.** Transcripción del formato de preinspección.

Fecha	14/03/2022	Ciudad	CDMX
Lugar	Patio Júpiter	Hora	
No del Motor del Vehículo (NI)	MIV000023B / MIV000024B	No del Chasis del Vehículo (NI)	TZ330XSY LZYTGVFW4L1005532
Vehículo Marca	YUTONG	Referencia del Vehículo	9401
Lectura del Odómetro (km)	74 997.32	Empresa Operadora	MIVSA
Inspección Tren Motriz Ejecutada por:	JOSÉ FERNÁNDEZ CARRICHE	Serial del Escáner	YUTONG_PC
Inspección Sistema de Suspensión Ejecutada por:	JOSÉ FERNÁNDEZ CARRICHE	Serial Equipo Alineación	HUNTER, PA_130 FWC2219
Inspección de Neumáticos Ejecutada por:	JOSÉ FERNÁNDEZ CARRICHE	Detalle de los Equipos Usados para Inspección Neumáticos	PROFUNDÍMETRO DIGITAL
Inspección Sistema de Recarga Ejecutada por:	PERSONAL YUTONG	Serial Equipo de Inspección y Diagnóstico	YUTONG_PC
A continuación, incluya los parámetros solicitados y registrados por los sistemas de I&D del vehículo			
Parámetro	Unidad	Valor	Comentario
SOH	%	89.9	
Odometro	km	74 997.32	
Número de Motores	---	2	
Número de Inversores	---	1	
Número de Baterías	---	16	ALTA POTENCIA (564 kWh)
Profundidad Neumático 1	mm	15	
Profundidad Neumático 2	mm	16.1	
Profundidad Neumático 3	mm	14.5	



Profundidad Neumático 4	mm	14.2	
Profundidad Neumático 5	mm	14.4	
Profundidad Neumático 6	mm	14.7	
Profundidad Neumático 7	mm	14.4	
Profundidad Neumático 8	mm	14	
Profundidad Neumático 9	mm	14.4	
Profundidad Neumático 10	mm	14.1	
Tensión de Recarga	V	629.2	
Corriente de Recarga	Amp	189	
Potencia de Recarga	kW	118.9	
Camber	o	NA	NO FUE DETERMINADO

El técnico de la empresa fabricante llevó a cabo el diagnóstico del sistema electrónico mediante OBD (*On-Board Diagnostic*) a través del cual se verificó que no se presentaron señales de falla en ninguno de los módulos del sistema.



**Figura 3.** Diagnóstico OBD sin fallas en los sistemas del vehículo. Fuente Yutong 14/03/2022.

## LASTRADO Y PESAJE

En condiciones ideales, cada eje del vehículo se pesa cada vez que se cambia la carga. Sin embargo, la báscula se tuvo disponible únicamente durante el transcurso de una mañana, por lo que se tomó la decisión de llevar a cabo el lastrado gradual y los pesajes correspondientes durante un día e iniciar la prueba con la carga completa. Este proceso se llevó a cabo en las instalaciones de Patio Júpiter, con apoyo del personal de la empresa operadora.



**Figura 4.** Material y lastrado del vehículo.

De acuerdo con las cargas nominales y el material disponible para el lastrado, se planteó realizar la distribución de cargas conforme a lo descrito en la tabla 9 para cada escenario, procurando una distribución lo más homogénea posible, considerando la distribución de asientos, pasillos y áreas libres dentro del autobús.

**Tabla 9.** Cargas nominales y distribución de material para cada caso.

Carga Nominal (%)	Material de carga	Carro delantero	Carro trasero
0	--	--	--
25	51 costales 50 Kg	27 costales	24 costales
50	+ 42 bidones 50 L	+ 22 bidones	+ 20 bidones
75	+ 42 bidones 50 L (total 84)	+ 44 bidones	+ 40 bidones
100	+ 42 bidones 50 L (total 126)	+ 66 bidones	+ 60 bidones

En cada nivel de lastrado, el vehículo se pesó en cada uno de sus ejes. Para el pesado se empleó una báscula de acero de perfil bajo, para piso, tipo placa, marca WIM-Systems y modelo AW-ULP<sup>7</sup>, con capacidad de carga de hasta 40 toneladas. Con la finalidad de pesar cada eje, se utilizaron simultáneamente dos placas acopladas a un sistema de control de pesaje, a través del cual se detecta y registra el peso. El técnico de la empresa que facilitó el equipo fue responsable de operar el sistema de pesaje.



**Figura 5.** Básculas y proceso de pesaje.

Los resultados del pesaje para cada escenario de carga se presentan en la tabla 10. El Eje 1 corresponde al eje frontal, el Eje 2 al intermedio y el Eje 3 al trasero. Mientras que R1 corresponde al lado izquierdo del vehículo (conductor) y R2 al lado derecho (puertas).

<sup>7</sup> Ficha técnica: <http://www.wim-systems.com/pdf/pesaje-vehicular/tapete-de-pesaje-aw-ulp-i.pdf><http://www.wim-systems.com/pdf/pesaje-vehicular/tapete-de-pesaje-aw-ulp-i.pdf><http://www.wim-systems.com/pdf/pesaje-vehicular/tapete-de-pesaje-aw-ulp-i.pdf>

**Tabla 10.** Distribución de peso por eje y lado de autobús para cada escenario de carga.

Carga Nominal (%)	R1-1	R2-1	Eje 1	R1-2	R2-2	Eje 2	R1-3	R2-3	Eje 3
0	2440	1760	4200	3260	2800	6060	4220	3180	7400
25	2540	2860	5400	3500	2860	6360	5220	4140	9360
50	2840	2860	5700	3980	3060	7040	5620	4900	10 520
75	3340	3340	6680	4120	3300	7420	5940	5920	11 860
100	3700	3220	6920	4800	3620	8420	6800	6200	13 000

Debido a que hubo variaciones en el peso del material que se empleó para simular la carga de los pasajeros transportados (costales de arena y bidones con agua), se presentaron diferencias entre la carga nominal y la carga real. En la tabla 11 se presenta la carga agregada en cada escenario, así como su correspondencia con la carga real transportada.

**Tabla 11.** Carga nominal vs carga real.

Carga nominal (%)	Peso bruto vehicular (kg)	Carga añadida (kg)	Porcentaje de la capacidad de carga (%)
0	17 660	0	0
25	21 120	3460	34.3 %
50	23 260	5600	54.9 %
75	25 960	8300	81.3 %
100	28 340	10 680	104.9 %

## PRUEBAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN RUTA

Se realizaron pruebas en ruta con diferentes capacidades de carga en condiciones reales de operación. Se inició con la máxima capacidad y retirando gradualmente el lastre al cierre de cada jornada.

Para el recorrido en ruta, la empresa operadora asignó una jornada operativa que recorre ocho veces el ciclo Tenayuca-Pueblo Santa Cruz Atoyac-Tenayuca, cubriendo una distancia de aproximadamente 320 kilómetros. Teóricamente, para este servicio, el autobús sale de Patio Júpiter a las 05:02 horas e inicia su recorrido en Tenayuca a las 05:12 horas, el octavo ciclo cierra en Tenayuca a las 01:35 horas del día siguiente y el autobús regresa a Patio Júpiter a las 01:50 horas, tras casi 21 horas en circulación.

Dos operadores de la empresa fueron asignados para conducir el autobús durante las pruebas en ruta. En todas las ocasiones el primer turno lo cubrió

el Operador A, quien condujo los primeros cuatro ciclos, desde las 05:02 horas hasta las 15:29 horas; mientras que el segundo turno fue cubierto por el Operador B, quien condujo los ciclos restantes, desde las 15:33 horas hasta el cierre de la jornada. Durante la primera jornada en ruta, un supervisor de la empresa operadora acompañó a bordo y capacitó a los operadores en la manipulación del termohigrómetro y el registro de datos en el formato antes presentado. En este se deben registrar al inicio de cada ciclo: la hora, el estado de carga, la temperatura, la humedad relativa y la lectura del kilometraje en odómetro. El ICCT acompañó el primer ciclo en ruta de cada jornada durante toda la evaluación y supervisó en los cierres de jornada la descarga gradual del material de lastrado.

En la tabla 12 se presentan las distancias recorridas de acuerdo con las lecturas de odómetro registradas en los formatos. Para los escenarios 0 %, 50 % y 100 % se recorrió ocho veces el ciclo propuesto, de acuerdo con lo planeado, mientras que para el escenario 75 % se recorrió seis veces y para el escenario con 25 % de carga, se hicieron siete ciclos.

**Tabla 12.** Distancias recorridas durante cada prueba.

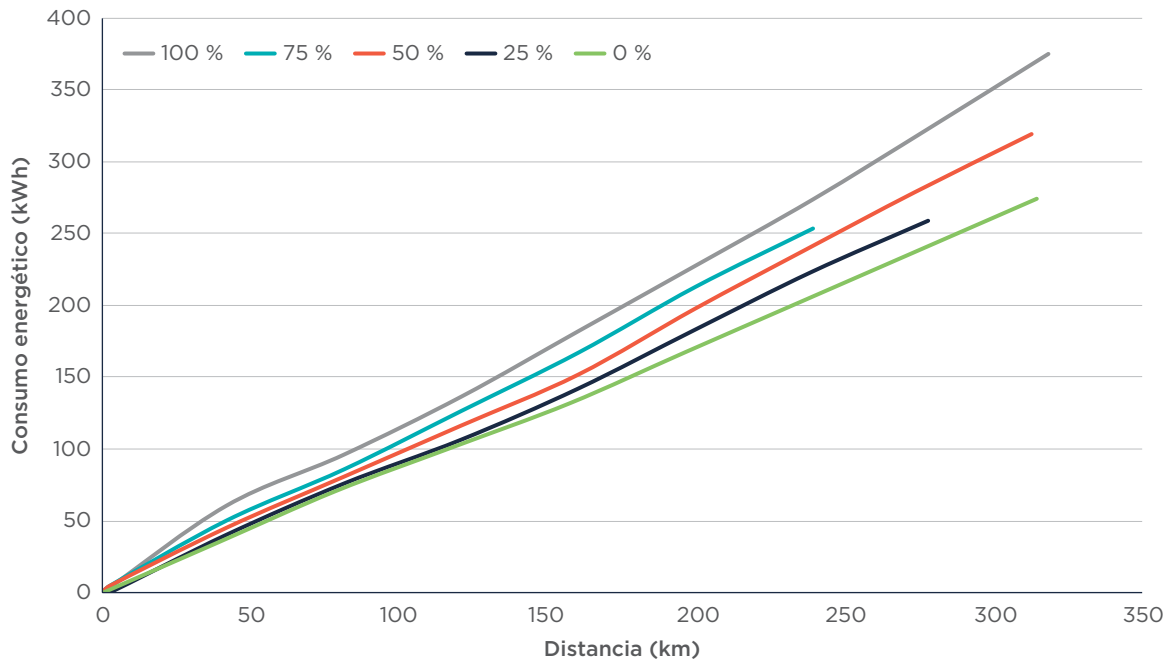
Carga nominal (%)	Fecha	Ciclos recorridos	Distancia (km)
0	21/03/22	8	319.96
25	19/03/22	7	278.16
50	18/03/22	8	316.36
75	17/03/22	6	242.02
100	16/03/22	8	321.61

El consumo energético registrado a través del estado de carga en el tablero se documentó en los formatos al iniciar cada ciclo de operación. A partir de los datos recolectados, se determinó la variación en el estado de carga ( $\Delta\text{SoC}$ ) para cada escenario, cuyos valores se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13.** Variación en el estado de carga (SoC) durante cada prueba.

Carga nominal (%)	Fecha	SoC <sub>i</sub> (%)	SoC <sub>f</sub> (%)	$\Delta\text{SoC}$
0	21/03/22	98	44	54
25	19/03/22	99	48	51
50	18/03/22	99	36	63
75	17/03/22	99	49	50
100	16/03/22	100	26	74

A partir de los valores de estado de carga y con consideración del estado de salud de las baterías y su capacidad real, determinada antes del desarrollo de las pruebas, se generaron las curvas de consumo energético vs distancia recorrida, las cuales se presentan en la figura 6. Como es de esperar, conforme aumenta la carga transportada, la energía requerida para recorrer la misma distancia es mayor.



**Figura 6.** Consumo energético vs distancia para cada escenario de carga.

**Tabla 14.** Relación consumo energético vs distancia para cada escenario de carga.

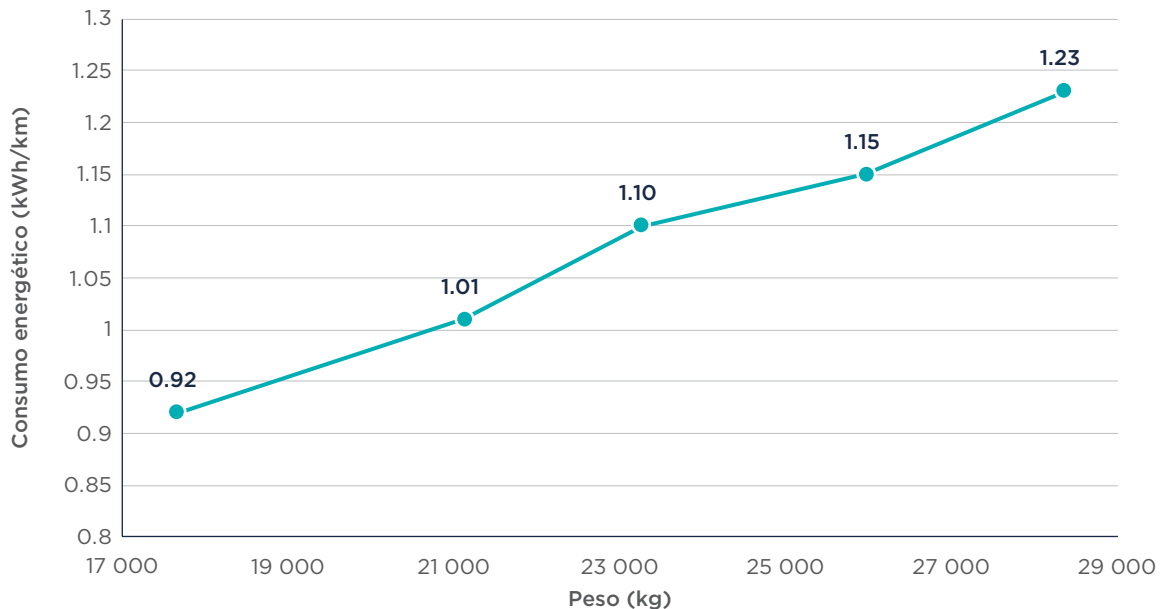
Carga nominal (%)	Fecha	Distancia (km)	Energía neta consumida (kWh)
0	21/03/22	319.96	274.0
25	19/03/22	278.16	258.8
50	18/03/22	316.36	319.7
75	17/03/22	242.02	253.7
100	16/03/22	321.61	375.5

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 15, así como en la figura 7.

A partir de los consumos calculados con los datos registrados durante la serie de pruebas con cargas conocidas, el desempeño energético del autobús evaluado oscila en un rango entre 0.92 kWh/km y 1.23 kWh/km, presentando incrementos de 0.09 kWh/km entre 0 % y 0.34 % de carga y entre 34 % y 55 %, de 0.05 kWh/km entre 55 % y 81 % y de 0.08 kWh/km entre 81 % y 105 %.

**Tabla 15.** Consumo energético medido para cada escenario de carga.

Carga nominal (%)	Porcentaje de la capacidad de carga (%)	Pasajeros equivalentes	Peso bruto vehicular (kg)	Consumo energético (kWh/km)
0	0	0	17 660	0.92
25	34.3	54	21 120	1.01
50	54.9	87	23 260	1.10
75	81.3	130	25 960	1.15
100	104.9	167	28 340	1.23



**Figura 7.** Consumo energético medido para cada escenario de carga.

## CONCLUSIONES

Para poder establecer una relación entre el consumo energético y la carga transportada por el autobús articulado eléctrico, que opera en la Línea 3 del Sistema Metrobús de la Ciudad de México, se llevaron a cabo pruebas de desempeño. Estas se realizaron en condiciones controladas para diferentes escenarios de carga, simulando la operación cotidiana en condiciones reales.

Durante el desarrollo de las pruebas se contó con la participación de Metrobús, la empresa operadora MIVSA, el fabricante del autobús Yutong y el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés).


Antes de realizar las pruebas se determinó el estado de salud (SoH) del banco de baterías del vehículo, que, tras un año y medio de operación, resultó mantener 89.9 % de su capacidad original, en consistencia con el desvanecimiento de capacidad esperado por el fabricante. Se verificó, mediante una preinspección, que el vehículo se encontrara en condiciones adecuadas para el desarrollo de las pruebas y, en este proceso, se verificaron los sistemas de suspensión, neumáticos, el tren motriz y sistema eléctrico, sin registrarse ninguna falla.

Se evaluaron cinco escenarios de carga, para lo cual se lastró el autobús con costales de arena y bidones de agua, simulando el peso de los pasajeros. Los escenarios de capacidad de carga que se evaluaron corresponden a 0 %, 34 %, 55 %, 81 % y 105 %, agregándose una carga total de hasta 10 680 kg.

Durante cada escenario se recorrió la ruta más larga de la Línea 3, desde Tenayuca hasta Pueblo Santa Cruz Atoyac, y se realizaron ocho ciclos completos para los escenarios 0 %, 55 % y 105 %, circulando alrededor de 320 kilómetros, así como siete ciclos para el escenario 34 %, de alrededor de 280 kilómetros, y seis ciclos para el escenario con 81 % de carga, de cerca de 240 kilómetros. Se registraron parámetros de operación y eléctricos, tanto de forma manual, registrando datos del tablero del autobús en los formatos elaborados para este propósito, como a través de equipos de telemetría, mediante un dispositivo administrador de datos (comúnmente conocido como *datalogger*), los cuales fueron procesados y analizados posteriormente.

Se generaron las curvas de consumo energético contra distancia y se determinaron los consumos de energía por kilómetro recorrido para cada escenario, obteniéndose un comportamiento consistente entre las pruebas:





conforme se transporta más peso mayor es la energía requerida para recorrer la misma distancia.

Se adquirieron valores del consumo por kilómetro en el rango entre 0.92 kWh/km, para el autobús con carga de 0 %, hasta 1.23 kWh/km, para la condición de 105 % de la capacidad de carga.

## CONTACTO

zebra@theicct.org  
zebra@c40.org



SOCIO DE APOYO



AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES