



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



SOCIO DE APOYO




AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES





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

Agradecemos a Metrobús por sus atenciones, información, revisiones y retroalimentación, desde su Director General, Roberto Capuano, hasta las áreas técnicas a Fredy Velázquez, Candi Dominguez, César Serrano, Vania Terrones, Marcel Gómez y del área financiera a Enedina Franco.

Este estudio fue desarrollado por Leticia Pineda, Carlos Jiménez y Óscar Delgado con el apoyo de Ana Beatriz Rebouças, Tales Rozenfeld, Carlos Bueno, Kate Blumberg, Lingzhi Jin y Caleb Braun.

Cualquier error es responsabilidad de los autores.

Leticia Pineda, Carlos Jimenez y Oscar Delgado
International Council on Clean Transportation (ICCT)



TABLA DE CONTENIDOS

Resumen de la estrategia	1
Contexto	2
Servicio de transporte público colectivo	4
Principales actores del transporte público.....	5
Sistema Metrobús	7
Organización	7
Flota vehicular.....	8
Línea 3	11
Línea 4.....	12
Metodología.....	13
Análisis	15
Análisis de ruta	15
Análisis por vehículo	16
Análisis de flota	23
Resultados	25
Costo total de propiedad.....	25
Análisis de sensibilidad	27
Emisiones	31
Conclusiones e Investigación futura/pendiente.....	37
Referencias	40

RESUMEN DE LA ESTRATEGIA

Este documento resume la estrategia de electrificación de flota para el sistema de autobuses de tránsito rápido (BRT) Metrobús en sus primeras dos líneas en incorporar autobuses eléctricos de batería en la Ciudad de México. Las Líneas 3 y 4 servirán como punta de lanza para sentar las bases de la estrategia integral de electrificación de todo el sistema que Metrobús pretende lograr en los siguientes 10 años. En 2022 se espera una renovación del 80% de la flota en estas dos líneas porque sus unidades ya llegaron al límite de su vida útil de 10 años: la Línea 3 debe renovar 60 autobuses, mientras que la Línea 4 debe renovar 54 autobuses.

Tomando en cuenta el plan anterior, así como el compromiso de la Ciudad de México de implementar un corredor de Metrobús 100% cero emisiones al 2024 (Línea 3), el ICCT ha modelado las oportunidades de electrificación de dos líneas del sistema. Estas corresponden a la Línea 3 que opera con 81 buses articulados de 18 metros y la Línea 4 que opera con 90 autobuses de 12 metros.

Con el acompañamiento del ICCT y el C40, coordinados en el proyecto Acelerador para el Despliegue Rápido de Autobuses Cero Emisiones (ZEBRA, por su sigla en inglés)¹, se apoyó a Metrobús desde las primeras discusiones sobre la electrificación del sistema y un primer piloto, se hicieron recomendaciones sobre requerimientos técnicos para los nuevos autobuses eléctricos, y todo esto se concretó en septiembre de 2020 con el inicio de la fase piloto del primer autobús articulado eléctrico en la Línea 3. En julio 2021 se recibieron nueve unidades más con las mismas características, las cuales iniciaron operaciones a finales de agosto del mismo año. Por otro lado, la Línea 4 concluyó un piloto de 6 meses con un autobús de 12 m de piso bajo, en préstamo durante el primer semestre de 2021; esta misma unidad realizó pruebas en la ciudad mexicana de León, Guanajuato y viajará a otras ciudades de América Latina para continuar sus pruebas.

Se espera que los pilotos en ambas líneas, acompañados de los cambios necesarios en los modelos de adquisición y financiamiento de autobuses e infraestructura de recarga, así como en la operación de los corredores, permitan informar y habilitar la adquisición de autobuses cero emisiones para la totalidad de la renovación de la flota de Metrobús, en el corto, mediano y largo plazo.

¹ Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (ZEBRA)


CONTEXTO

La Ciudad de México (CDMX) es una de las regiones más densamente pobladas a nivel mundial con casi 9 millones de habitantes y casi 22 millones en su zona conurbada, esto presenta retos de movilidad y problemas de calidad del aire importantes. El transporte pesado a diésel en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) representa tan sólo el 6% de la flota, pero es la principal fuente de partículas finas ($PM_{2.5}$), aportando el 76% de ellas, y es responsable del 91% del carbono negro y 45% de los óxidos de nitrógeno (NO_x) dentro del sector transporte (Secretaría del Medio Ambiente 2018). Los NO_x son un contaminante relevante para la CDMX ya que es un principal precursor del ozono, el cual ocasiona la mayoría de las contingencias ambientales (Secretaría del Medio Ambiente 2018; Verónica Garibay Bravo and Blumberg 2021).

Los autobuses de transporte público presentan una oportunidad para la renovación hacia tecnologías vehiculares cero emisiones ya que son una flota cautiva que circula dentro de la ciudad, centralizada y regulada por el gobierno y con rutas predeterminadas, características que facilitan la introducción de autobuses eléctricos acompañados de estrategias de recarga adecuadas.

La CDMX ya cuenta con experiencia en flotas eléctricas pues posee un sistema de trolebuses desde hace más de 70 años que sigue creciendo. Este sistema incluye 9 líneas con una cobertura de poco más de 200 km y atiende a una demanda diaria de 130 mil pasajeros (Secretaría de Movilidad 2020). Se han adquirido 193 nuevos trolebuses desde 2019 que utilizan la infraestructura de catenaria existente en algunas zonas de la ciudad y se tiene como meta llegar a una flota de 500 trolebuses al 2024 (Gobierno de la Ciudad de México 2019a).

El Gobierno de la Ciudad ha formalizado su compromiso hacia la mejora de la movilidad y la transición a la electromovilidad en varios programas e instancias. La CDMX es signataria desde 2017 de la Declaración de C40 por unas Calles Libres de Combustibles Fósiles donde se comprometió a adquirir solamente autobuses cero emisiones a partir del 2025 y asegurar que una zona importante de la ciudad sea cero emisiones al 2030 (C40 2017). Este último compromiso se ha afirmado al anunciarse una zona de bajas emisiones en la zona central de la ciudad (Gobierno de la Ciudad de México 2019b). Estos compromisos se alinean a las de otras ciudades en el mundo que han implementado zonas de bajas y cero emisiones y han incentivado



una renovación de flota vehicular hacia cero emisiones (Cui, Gode, and Wappelhorst 2021).

Otros instrumentos de política pública y de planeación de la CDMX también presentan metas ambientales relevantes para la ciudad. El Plan de reducción de emisiones del sector movilidad anunció el compromiso de reducción del 30% de las emisiones de contaminantes criterio de fuentes móviles al 2024 (Gobierno de la Ciudad de México 2019b). El Programa Ambiental y de Cambio Climático para la Ciudad de México 2019-2024 anunció el compromiso desde 2019 de reducir el 30% de las emisiones del sector transporte, incluyendo la implementación de un corredor de Metrobús 100% cero emisiones al 2024 (Gobierno de la Ciudad de México 2019a). En septiembre de 2020 se anunció un nuevo corredor de Metrobús, la Línea 8 o “Circuito Cero”, la cual se pretende operar con una flota aproximada de 196 autobuses eléctricos de 12 metros. La línea recorrerá el Circuito Interior por lo que será la más larga del sistema con una longitud de aproximadamente 50 kilómetros, 144 estaciones y atenderá una demanda de 227 mil viajes al día. El inicio de operaciones se programa al cierre de 2022.

Bajo el marco de una nueva Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable de la CDMX publicada el 9 de junio de 2021 (Jefatura de Gobierno 2021), la CDMX publicó su Estrategia y Programa de Acción Climática donde se compromete a la neutralidad en carbono al 2050. Un eje primordial para alcanzar dicha meta es la electrificación del transporte, particularmente el transporte público (Secretaría del Medio Ambiente 2021). Si bien este documento se centra en la estrategia de despliegue de buses eléctricos para dos líneas de Metrobús, se espera que las lecciones aprendidas de los pilotos y la electrificación de rutas sirva de referencia para las otras líneas y sistemas que constituyen el transporte público de pasajeros.

A nivel federal, se continúa trabajando en la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica y la normativa ambiental vigente que regula las emisiones de los vehículos pesados nuevos (NOM-044-SEMARNAT-2017) permite la coexistencia de distintos estándares de emisiones ambientales, equivalentes a Euro V y Euro VI/EPA 2010 (libres de hollín). Esta convivencia debía terminar el 31 de diciembre de 2020, sin embargo, en dos ocasiones se ha retrasado la entrada en vigor de los estándares más limpios a nivel mundial, con una nueva fecha hasta 2025 (SEMARNAT 2021), a pesar de ser la medida más importante para la reducción de carbono negro de la contribución nacional determinada (NDC) de México. Avanzar hacia la electromovilidad es una razón más para

fortalecer las medidas locales y salvaguardar el derecho a un medio ambiente sano de los habitantes de las ciudades con mayores problemas de calidad del aire como es la Ciudad de México.

A pesar de este rezago a nivel federal, el pasado 3 de septiembre de 2020 se publicó un decreto ejecutivo para exentar de manera temporal por cuatro años, los aranceles de importación a los vehículos eléctricos (no a sus componentes), los cuales representan un 20% de su costo (Presidencia de la República 2020). Esto permitirá acelerar la introducción de tecnologías cero emisiones a México. Se espera que vehículos de cero emisiones puedan producirse en el país en el corto y mediano plazo mediante alianzas entre fabricantes de camiones, baterías y autopartes. Recientemente, Volvo México ha anunciado la posibilidad de fabricar autobuses eléctricos en México sustentados en la demanda de las nuevas líneas de Metrobús, al igual que Scania México busca fabricar autobuses localmente en alianza con carroceros del país.

SERVICIO DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO

El servicio de transporte público colectivo en la CDMX (Figura 1) se atiende mediante cuatro grandes sistemas (Secretaría de Movilidad 2020):

1. El sistema de autobuses de tránsito rápido (BRT) Metrobús con una flota de 771 vehículos diésel de diversas tipologías y 9 eléctricos articulados 18 m que atienden una demanda de 1.4 millones de pasajeros al día;
2. Grandes corredores privados concesionados que agregan a una flota de 1,666 vehículos diésel y gas natural y atienden una demanda de 375 mil pasajeros al día;
3. Concesiones de pequeñas flotas privadas con una tipología de autobuses de menor tamaño, tanto diésel como gas natural, que agrupan a la mayoría de los vehículos de la flota de transporte público colectivo en la ciudad, con un parque vehicular registrado de 20,579 unidades operando en 103 rutas y que traslada a 7.2 millones de personas usuarias diariamente (SEMOVI 2020), por último;
4. Flotas públicas a través de dos organismos principales, el Servicio de Transportes Eléctricos (STE) que cuenta con una flota de 300 trolebuses aproximadamente y transporta 130 mil pasajeros al día y la Red de Transporte de Pasajeros (RTP) que consolida 1,139 autobuses, principalmente de 12 m diésel para atender una demanda de 378 mil pasajeros al día.

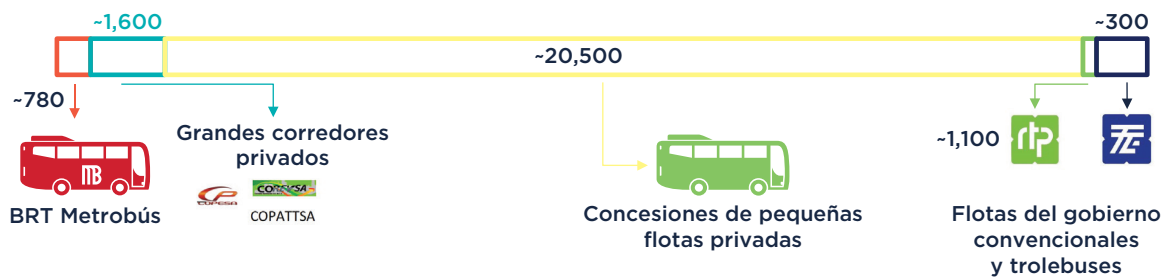


Figura 1. Sistema de transporte público de la CDMX
Fuente: Adaptada y actualizada de Dalberg, 2020


La CDMX busca la transición a una flota de vehículos de mediana capacidad por lo que los microbuses y vagonetas han ido y seguirán desapareciendo, conformándose en corredores concesionados de autobuses (Secretaría de Movilidad 2020).

PRINCIPALES ACTORES DEL TRANSPORTE PÚBLICO

La Secretaría de Movilidad (SEMOVI) reglamenta la operación del Sistema Integrado de Transporte Público² y regula la prestación de este servicio con el objetivo de impulsar el transporte de cero o bajas emisiones (Congreso de la Ciudad de México 2014; Secretaría de Movilidad 2020). La Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) establece los programas de verificación vehicular obligatoria asociados con límites de emisión de contaminantes para distintos tipos de vehículos, y esto no es la excepción para el Sistema Metrobús que tiene que verificar y pasar la prueba para todas sus unidades. La SEDEMA es responsable de desarrollar, en consulta con las demás dependencias de gobierno, las estrategias y programas de mitigación al cambio climático y mejora de la calidad del aire. Tanto la SEMOVI como la SEDEMA trabajan de manera conjunta para impulsar y fomentar la adopción de vehículos limpios y establecer programas y políticas orientadas a mejorar la movilidad integral de la ciudad y reducir las emisiones contaminantes.

La CDMX ya cuenta con experiencia en el despliegue de vehículos eléctricos a través del sistema de trolebuses como se mencionó anteriormente. A la par de este avance en electromovilidad, Metrobús es pionero en la adopción de autobuses eléctricos de batería y ha establecido el compromiso de un corredor 100% cero emisiones al 2024. En esta transición se han ido sumando otros

² El Sistema Integrado de Transporte está compuesto por el transporte público masivo (Metro, Metrobús y Tren Ligero), colectivo (Trolebús, RTP, taxis eléctricos y servicio de transporte concesionado que opera rutas de vagonetas, microbuses y autobuses, taxis y servicios de aplicación o TNCs) e individual de pasajeros (ECOBICI, y bicis y monopatines eléctricos sin anclaje).



actores como empresas de energía que habilitan modelos innovadores de financiamiento y adquisición de los vehículos y que ya trabajan con algunas empresas operadoras de Metrobús.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) que es la empresa productiva del estado que tiene por objetivo la transmisión y distribución de energía eléctrica, es un actor clave. Si bien aún no se publica la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, la CFE ya está evaluando los escenarios de demanda eléctrica de distintos tipos de flota incluyendo la estrategia de electrificación de Metrobús. Sin embargo, no existe por el momento un programa de infraestructura o esquema de tarifas para sistemas de transporte colectivo.

Finalmente, la iniciativa ZEBRA ha permitido el acercamiento y visibilidad de varios actores claves entre ellos, fabricantes de autobuses y baterías, instituciones de financiamiento, organizaciones de cooperación y asistencia técnica, y las ciudades y gobiernos de varias ciudades en América Latina donde se presentan oportunidades de electrificación de flota de transporte público. Para el caso de México, ZEBRA logró comprometer a fabricantes y financiadores a ofrecer productos y financiar proyectos de autobuses eléctricos.³

³ Para consultar la información del evento “Futuro cero emisiones: El pacto ZEBRA con fabricantes e inversionistas de buses”, acceder a <https://theicct.org/events/zebra-pact-ebus-dec2020>

SISTEMA METROBÚS

ORGANIZACIÓN

Metrobús se integra por siete líneas operadas por compañías concesionarias con una flota total de 771 vehículos diésel y 9 eléctricos.⁴ Esta flota es operada por 15 empresas privadas concesionarias y por el organismo público RTP, cubriendo una red de más de 169 km de extensión, con 278 estaciones en siete líneas y atendiendo alrededor de 1.4 millones de pasajeros.

El sistema se organiza por: 1) empresas transportistas a las que se concede el servicio de transporte mediante una licitación pública, 2) empresas responsables del recaudo y, 3) Metrobús, el organismo público descentralizado encargado de administrar, planear y controlar el sistema de corredores de transporte. Metrobús establece las características e implementa y evalúa las licitaciones de adquisición de flota nueva y servicios asociados (e.g., sistemas de información, recaudo, etc.), también concentra y administra los recursos que se generan por el pago de tarifa en un fideicomiso privado.

Bajo el modelo actual, las empresas operadoras son encargadas de la compra, operación y mantenimiento de los autobuses, en concesiones con duración de 20 años y bajo los lineamientos establecidos en las licitaciones por parte de Metrobús; las empresas de recaudo son responsables de la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de ingresos por peaje. Los pagos a las empresas prestadoras de servicios del sistema se realizan a través de un fideicomiso privado. Este fideicomiso se rige a través de un comité técnico que se integra tanto por Metrobús como por los operadores.

La Figura 2 muestra la representación de la organización del sistema Metrobús y los flujos financieros asociados.

⁴ El primer bus eléctrico que llegó al sistema Metrobús es un piloto en préstamo por la empresa VEMO, <https://metrobuselectrico.info>



Figura 2. Estructura del modelo actual Metrobús (elaboración propia)

FLOTA VEHICULAR

La Figura 3 muestra el detalle de la flota de Metrobús para los vehículos diésel por tipología, estándar de emisiones y línea en la que operan, en total suman 780 autobuses:

- 438 autobuses articulados piso alto, de 18 m, con capacidad para 160 personas
- 153 autobuses biarticulados piso alto, de 24 m, con capacidad para 240 personas
- 90 autobuses doble piso, piso bajo, de 12 m, con capacidad para 130 personas
- 70 autobuses piso bajo de 12 m (incluyendo 9 híbridos diesel-eléctrico) con capacidad para 100 personas
- 20 autobuses piso bajo de 15 m con capacidad para 100 personas, y
- 9 autobuses articulados eléctricos piso alto, de 18 m para 160 pasajeros, que operan en Línea 3. Tienen una batería de 563 kWh y una autonomía de 330 km

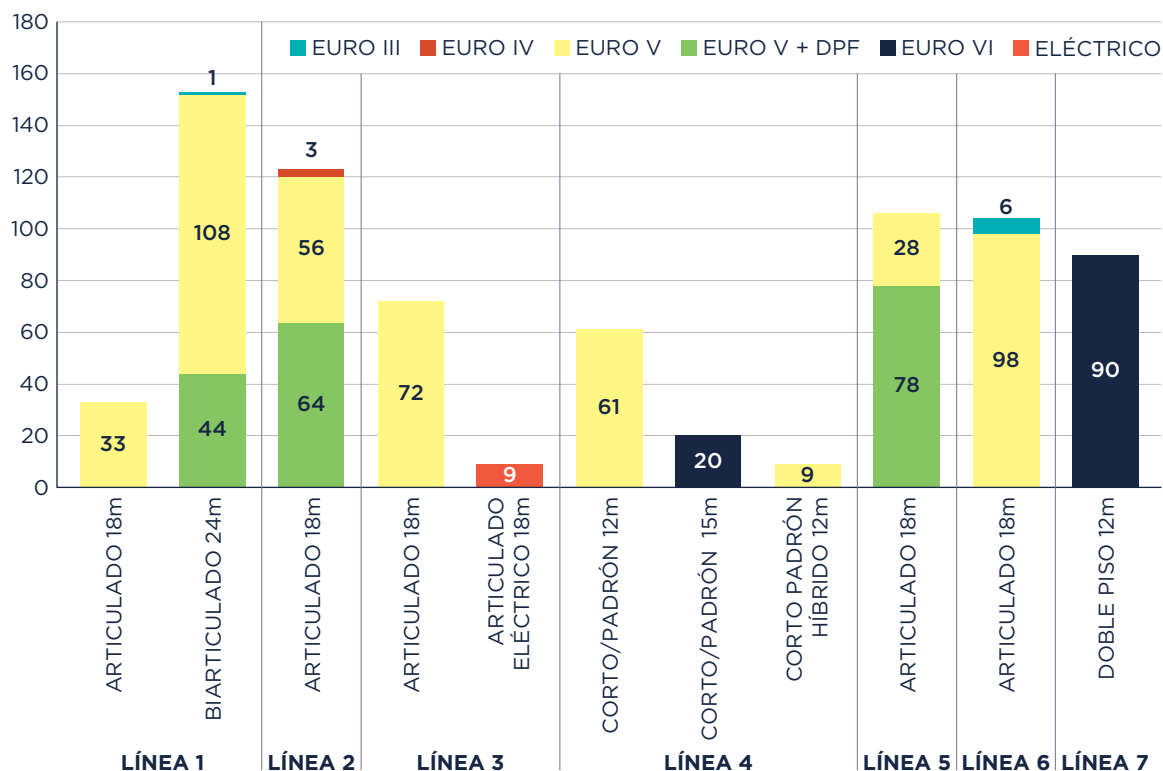


Figura 3. Detalle de flota por tipo de vehículo y estándar de emisiones

Metrobús ha adoptado una política general de renovación vehicular a los diez años de operación de cada autobús. Sin embargo, este criterio se especifica en cada una de las licitaciones y puede cambiar, como lo fue en el caso de la Línea 7—que circula por una de las avenidas más importantes de la ciudad, Paseo de la Reforma—con autobuses Euro VI doble piso y justamente por tener una tipología distinta y más costosa a la de la flota general se asumió una operación de 15 años.

La Figura 4 muestra la desagregación de la flota de Metrobús, por edad y año-modelo de cada autobús, el 9% de los vehículos de la flota rebasan la antigüedad máxima permitida usualmente establecida de 10 años.

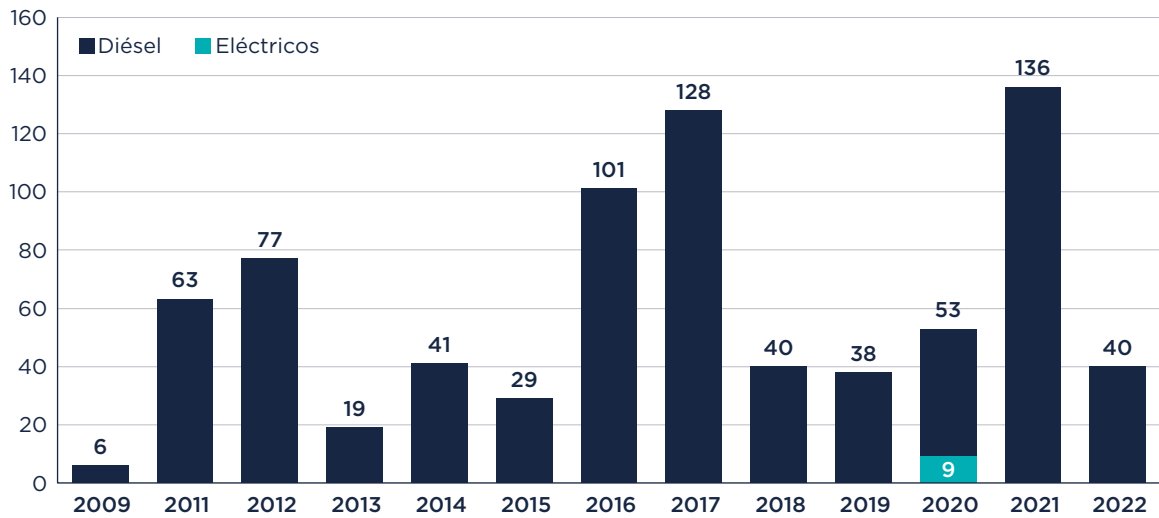


Figura 4. Año-modelo de la flota vigente

Se prevé que la renovación del sistema Metrobús alcance 508 vehículos al 2030, lo que representa un 65% de su flota total (Figura 4).

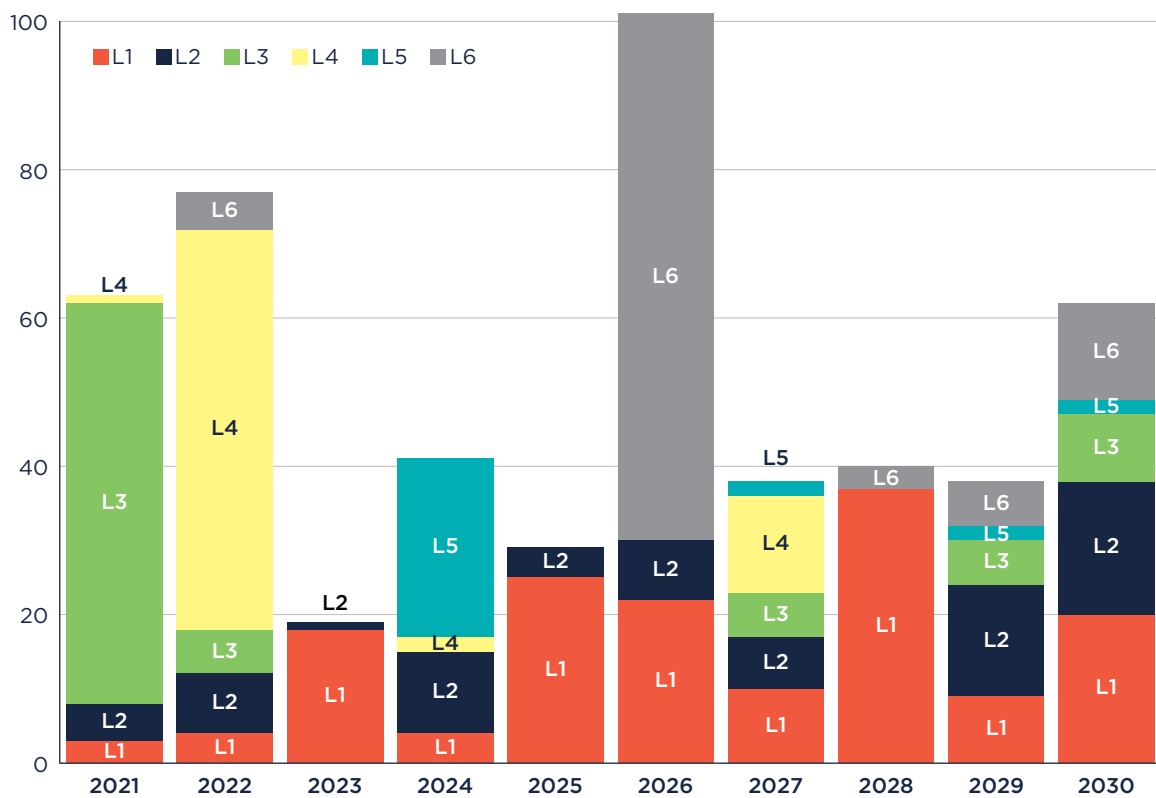


Figura 5. Programa de renovación de Metrobús 2021-2030

LÍNEA 3

La Línea 3 comunica a la zona noroeste con el sur de la ciudad y tiene una longitud de 22 km, cuenta con cinco terminales y 33 estaciones intermedias (Figura 6). Esta línea es operada con 81 autobuses articulados de 18 m. de largo piso alto con capacidad para 160 pasajeros, y atiende una demanda promedio de 168 mil pasajeros por día. La ruta de la Línea 3, similar a las otras del sistema, y cuenta con una pendiente máxima de 6 grados.

En 2019, la Ciudad de México anunció el compromiso de un corredor 100% cero emisiones en Línea 3. A partir de septiembre 2020 se ejecuta un proyecto piloto en la línea, con el primer autobús articulado eléctrico de 18 m, marca Yutong, el cual es monitoreado por el equipo de ICCT desde el 23 de diciembre 2020. Resultados preliminares de este monitoreo se utilizaron en este reporte.

En agosto de 2021 entraron en operación otros nueve autobuses eléctricos a batería con las mismas características, los cuales son adicionales a la flota debido a la ampliación de 3.6 km. Con base en el programa de renovación de Metrobús, durante 2021 se tendrían que sustituir 54 autobuses, sin embargo, se está priorizando la adquisición de autobuses eléctricos por lo que es factible un retraso del cronograma para que las nuevas unidades sean eléctricas. A 2030, se espera haber renovado el total de la flota de Línea 3 que corresponde a 81 unidades.



Figura 6. Mapa de la Línea 3 de Metrobús

Fuente: Metrobús, <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/fichas-tecnicas>

LÍNEA 4

La Línea 4 del Metrobús recorre una longitud máxima de 30 km; cuenta con tres terminales y 32 estaciones intermedias (Figura 7); y opera una flota de 90 autobuses de piso bajo de 12 m. y 15 m. de largo, con capacidad de 100 pasajeros, para atender una demanda promedio de 65 mil pasajeros por día.

La Línea 4 de Metrobús es considerada prioritaria en el despliegue de autobuses cero emisiones, ya que corre de oriente a occidente atravesando el Centro Histórico de la Ciudad de México, conectando al aeropuerto con la colonia Buenavista (zona de interconexión de diversas rutas de Metro, Metrobús y otras líneas convencionales).

La CDMX ha manifestado la intención de establecer una zona de bajas emisiones (ZBE) en el Centro Histórico, por lo que electrificar esta línea permitiría alcanzar esta meta (Gobierno de la Ciudad de México 2019b; C40 2017). A 2032, se esperaría poder renovar toda la flota de Línea 4.

Durante el primer semestre de 2021 se llevó a cabo un piloto con un autobús eléctrico 12 m., Volvo 7900, el ICCT acompañó la implementación y monitoreo del piloto de la mano del fabricante y Metrobús, y se recolectaron datos de operación del autobús durante el mes de febrero de 2020. Resultados preliminares de este monitoreo se utilizaron en este reporte.



Figura 7. Mapa de la Línea 4 de Metrobús

Fuente: Metrobús, <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/fichas-tecnicas>

METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este reporte se basa en los modelos desarrollados e implementados por ICCT en otros mercados de autobuses en Asia y América Latina para la evaluación de distintas tecnologías incluidas los vehículos eléctricos (Dallmann et al. 2021; Dallmann 2019; Jin et al. 2020). Los modelos de ICCT utilizados en este reporte permiten evaluar niveles de análisis: a nivel de ruta, vehículo y flota (Figura 8).

Para el análisis a nivel de ruta, necesitamos conocer las características de operación de cada línea, algunos parámetros como el consumo, la potencia y la velocidad varían en función de las características de cada ruta, hora del día, temporada y vida útil remanente del autobús y de la batería (Dallmann et al. 2021). Una forma de representar esta operación es mediante un ciclo de manejo para cada línea. El ciclo de manejo se obtiene al recolectar datos georeferenciados de los autobuses diésel, segundo-a-segundo (frecuencia de 1 hertz), de la operación real de la ruta, es decir, velocidad, distancia recorrida, altitud, número de paradas y tiempo en ralentí. La etapa de recolección de la información de las Líneas 3 y 4 inició en diciembre 2020 y concluyó en mayo de 2021. La metodología utilizada para el desarrollo del ciclo de manejo se basa en Jin et al. 2020.

El análisis por vehículo implica estimar los costos asociados a la operación durante la vida útil, o permitida por la política de renovación, para cada una de las opciones tecnológicas vehiculares a evaluar, es decir, el costo total de propiedad o TCO (*total cost of ownership*). Los costos asociados son costos de operación, mantenimiento, infraestructura y administrativos y se integran en el módulo de TCO de TURBO que se explica más adelante. Estos datos se obtuvieron mediante entrevistas con operadores y el equipo de Metrobús, así como de estudios previos para ZEBRA en México y otras ciudades.

El ciclo de manejo de la ruta sirve como insumo para la simulación computacional del comportamiento y desempeño de cada tipo de autobús a evaluar. Mediante esta simulación se obtiene el consumo energético de distintas tipologías y tecnologías de autobuses bajo distintos escenarios de operación donde se puede variar el peso, número de pasajeros transportados, el uso y consumo energético de accesorios, etc. Esta herramienta es útil cuando no se cuenta con datos reales de desempeño de los autobuses en consideración, permitiendo evaluar factibilidad técnica en cuanto a rango

eléctrico y estrategias de recarga para diversas rutas. Para el caso de Línea 3 y 4 se pudo contar con los datos de consumo reales recolectados a través del monitoreo de los pilotos en cada una de las líneas a través de sistemas de telemetría. Los ciclos de manejo que se obtuvieron pueden servir para futuros análisis al evaluar autobuses en distintas líneas del sistema Metrobús.

Por último, para el análisis de flota, se utilizó el modelo TURBO⁵ (*Toolkit for Urban Bus Operations*) desarrollado por el ICCT para apoyar la transición a nivel de ciudad hacia flotas de autobuses libres de hollín y/o cero emisiones. TURBO permite modelar la reducción de emisiones y los costos financieros asociados a la mejora de las flotas de autobuses.

TURBO integra datos de la flota y supuestos ajustables por el usuario, para obtener dos resultados estratégicos:

- Emisiones anuales de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero (GEI) por tipo de autobús, tecnologías del tren motriz y tipo de combustible para las rutas que se pretenden modernizar; y
- Una evaluación comparativa del costo total de propiedad por tecnología y combustible, para los autobuses por adquirir y en circulación.

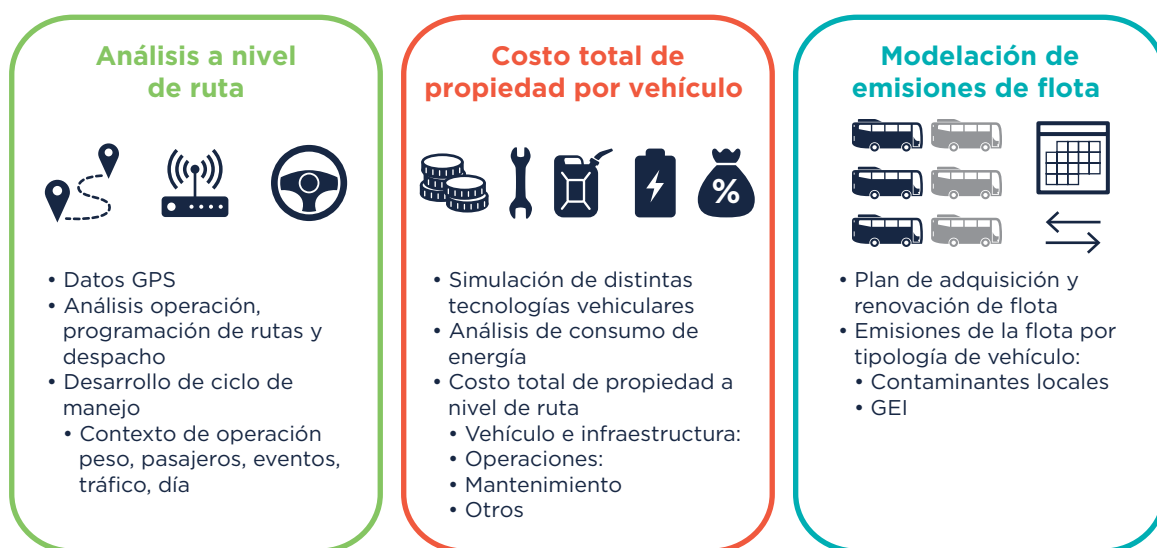


Figura 8. Metodología aplicada al análisis de la estrategia de despliegue de flota

5 Documentación herramienta TURBO: <https://github.com/theicct/TURBO>

ANÁLISIS

ANÁLISIS DE RUTA

DESCRIPCIÓN DE LA RUTA Y LA FLOTA

Las características generales e indicadores principales de las dos rutas evaluadas se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de Líneas 3 y 4

Parámetro	Línea 3	Línea 4
Número de autobuses	81	70
Tipología autobús	18m, piso alto, articulado	12m, piso bajo, standard
Modelo 1	Mercedes Benz Gran Viale (diésel)	Volvo 7700 (diésel)
Modelo 2	Volvo 7300 BRT (diésel)	Volvo ACCESS (diésel)
Modelo 3	Yutong (eléctrico a batería)	Volvo 7700 (diesel híbrido)
Capacidad	160 pasajeros por vehículo	90 pasajeros por vehículo
Demanda de viajes	180 mil viajes / día	68 mil viajes / día
Índice de pasajeros por kilómetro (IPK)	10.2	4.0
Kilómetros diarios	245	250
Kilómetros anuales	80 mil	81.5 mil
Longitud de la ruta	22 km	30 km
Velocidad promedio	18.8 km/h	19.0 km/h
Terminales	5	4
Estaciones intermedias	33	32
Horario de servicio	04:30 - 01:00	04:30 - 01:00

Fuente: Metrobús. Fichas técnicas de Líneas.

<https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/fichas-tecnicas>

CICLOS DE MANEJO

La información recolectada corresponde a la operación de dos autobuses por cada línea, monitoreados por tres y cuatro semanas para las Líneas 3 y 4, respectivamente.

La selección de cada tipo de ciclo se evalúa con base en las características de la ruta (Tabla 1) que den mayor representatividad a la operación de la línea. Para el caso de Línea 3 se utilizó el recorrido base y para Línea 4, dado que se compone de varias subrutas, se tomó como base la que incluye las dos

terminales del Aeropuerto Internacional de la CDMX, que es la más larga. La Tabla 2 muestra los ciclos de manejo obtenidos para ambas líneas.

Tabla 2. Características de los ciclos de manejo obtenidos para la Línea 3 y 4

Ruta	Duración (s)	Distancia (km)	Velocidad promedio (km/h)	Velocidad promedio de manejo (km/h)	Paradas por km	Ralentí (%)	Velocidad máx (km/h)
Línea 3 - Eje 1 Pte.	4,523	20.9	15.0	21.5	2.9	30 %	47.4
Línea 4 - Buena Vista - Aeropuerto	6,212	36.9	21.43	22.71	0.38	16 %	70.90

Estos ciclos de manejo son una representación de la operación de cada línea que agrega varios días de operación o segmentos determinados y no necesariamente coinciden con los datos presentados en la Tabla 1. Para mayor información sobre la metodología y detalles de la obtención de los ciclos de manejo referenciamos al lector a consultar Jin et al. 2020.

ANÁLISIS POR VEHÍCULO

COSTO TOTAL DE PROPIEDAD

A continuación se describen los datos de entrada, supuestos, y análisis de sensibilidad para el TCO de cada tipología de vehículo y línea analizada.

Costos de operación y supuestos

El módulo TCO de TURBO se alimenta de la información de costos relacionados a la inversión inicial, los intereses derivados de préstamos, la inflación, la operación, y el mantenimiento, entre otros. También se integran los costos relativos a la infraestructura asociada a las estaciones de recarga. El análisis a largo plazo del TCO permite evaluar de una manera justa, potenciales decisiones de inversión, siendo útil en el caso de inversiones en vehículos que tienen un mayor costo inicial pero que garantizan menores costos de operación a lo largo de su vida útil.

Uno de los insumos más importantes es el consumo de energía de los autobuses eléctricos, este se obtuvo mediante el monitoreo de la operación de los pilotos en Línea 3 y 4, mediante equipos de telemetría independientes a los equipos de GPS que se utilizaron para obtener los ciclos de manejo. Las características de los autobuses que se consideraron para cada línea se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de los autobuses eléctricos

Categoría	L3	L4
Fabricante	Yutong	Volvo
Prototipo	Prototipo para CDMX MB	Prototipo para ciudades europeas
AC	No	Sí
Capacidad pasajeros	160	95
Química de batería	LiFeP	Ion-litio
Capacidad batería	560 kWh	330 kWh
Tipología bus	Articulado 18 m	12m
Consumo esperado	1.4 kWh/km	1.4 kWh/km
Consumo real (preliminares)	0.91 kWh/km	1.2 kWh/km

Los consumos reales preliminares resultaron menores a los esperados en ambos pilotos, si bien esto puede representar un impacto positivo en el proyecto de electrificación, estos valores deben continuar siendo evaluados y contextualizados con otras variables asociadas a la tipología y características de cada vehículo, así como las condiciones de operación (peso, temperatura ambiente, recorrido diario, uso de accesorios, estilo de conducción del chófer, etc.) para poder obtener un dato promedio consensuado. Recomendamos realizar este tipo de análisis con la flota eléctrica vigente y los pilotos con otros fabricantes.

La Tabla 4 resume los costos y supuestos relevantes utilizados en el análisis TCO, entre los que se incluyen los costos de adquisición, financiamiento y operación (consumo de combustible; mantenimiento y administrativos); la información fue proporcionada mayormente por las compañías operadoras y Metrobús; los precios y costos relacionados al autobús eléctrico (BEB) también provienen de estudios realizados previamente para Metrobús en el contexto de la iniciativa ZEBRA.

Tabla 4. Datos de entrada para el análisis del TCO

Categoría	Componente	Definición	Valor utilizado en TCO L3	Valor utilizado en TCO L4	Referencias y supuestos
Adquisición del autobús e infraestructura	Pago inicial	Pago inicial para la adquisición del autobús o infraestructura.	10% del valor inicial		El resto se asume cubierto por el préstamo adquirido
	Infraestructura	Costo de cargador e instalación eléctrica requerida, por autobús	MX\$ 1.6 millones		Fuente: Metrobús
	Pagos del préstamo	Pagos a capital e intereses durante el periodo del préstamo.	Tasa de interés: 10.9%		Tasa de interés promedio para préstamos contratados para la adquisición de vehículos actualmente en operación. Fuente: compañías concesionarias.
	Valor de reventa	Cuando la duración de la operación planeada en el proyecto es menor a la vida útil del autobús, se considera el valor de reventa del vehículo depreciado	Proyecto a 10 años: el autobús diésel tiene valor de reventa cero; para el caso del eléctrico es un 6% de su valor. Proyecto a 15 años: el autobús eléctrico tiene un valor de reventa cero; para el caso del diésel es un 30% de su valor (adquirido en año 11).		Aplicación de depreciación acelerada de 25% para autobuses diésel y eléctricos, con base en la Ley del Impuesto sobre la Renta (ISR). Fuente: Gobierno de México 2021
Operación y mantenimiento	Consumo de combustible	Litro de diésel equivalente (DLE ⁶) consumido por kilómetro recorrido	0.77 DLE/km (0.08 kWh /km)	0.59 DLE/km (0.06 kWh /km)	Consumo promedio reportado por compañías operadoras. Fuente: Metrobús.
	Consumo de energía	Consumo de energía eléctrica por kilómetro recorrido	0.91 kWh/km	1.2 kWh/km	Consumo de energía promedio observado en autobús Yutong de 18 m en Línea 3 de enero a sept. 2021. Fuente: Monitoreo autobús Yutong (en curso), ICCT 2021, Datos Metrobús sobre el piloto de L4
	Costo de combustible	Costo de combustible por kilómetro	MX\$ 16.7 / km	MX\$ 12.8 / km	Calculado a partir de un precio de MX\$ 21.7 / L del diésel en junio 2021. 3 (SENER 2021)
	Costo de energía	Costo de energía por kilómetro	MX\$ 3.34 / km		Tarifa eléctrica intermedia en Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH). Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE) ⁷ .
	Mantenimiento	Costo regular del mantenimiento preventivo del autobús: incluye llantas, auto partes, lubricantes, mano de obra, etc.	Diésel: MX \$3.6 / km	Diésel: MX \$3.4 / km	Tarifas establecidas en contratos de mantenimiento preventivo. Fuente: Metrobús.
			Eléctrico: MX\$3.0 / km	Eléctrico: MX\$2.4 / km	L3. Tarifa de contrato de mantenimiento preventivo. Fuente: Metrobús. L4. Análisis de buses eléctricos para el corredor cero emisiones Eje 8 Sur (C40 CFF 2018). L4. Plataforma de Electromovilidad de Chile ⁸ .
	Costos de media vida autobús diésel	Mantenimiento mayor.	MX\$ 60 mil		Los costos se programan en el año 5. Fuente: compañías concesionarias.
Costos de media vida autobús eléctrico	Reemplazo de baterías	MX\$ 1.9 millones		Reemplazo de batería se programa en año 8. Fuente: ZEBRA 2021	

Fuente: Elaboración propia, con información proporcionada por Metrobús y compañías concesionarias

6 DLE: litro de diesel equivalente (diesel liter equivalent). Se utiliza el poder calorífico inferior de 9.95 kWh/L para convertir a kWh/km (Dallmann et al. 2021).

7 Se utilizaron dos tarifas para evaluar carga nocturna y de oportunidad durante el día: 1) Tarifa base: MX\$ 0.97 / kWh; costo de energía cuando la carga se realiza entre 00:00 a 06:00 horas; 2) Tarifa intermedia: MX\$ 1.59 / kWh; costo de energía cuando la carga se realiza entre 06:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 horas.

8 <https://energia.gob.cl/electromovilidad/transporte-de-pasajeros/buses-electricos-red>

Definición de escenarios

Para el análisis del TCO se analizaron los escenarios de renovación de flota en Línea 3 y 4 con base en la planeación actual de Metrobús. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, evaluando el impacto de algunos de los parámetros con mayor incertidumbre.

Escenario base:

- **Días de operación anuales:** 325 días
- **Tecnología vehicular:** se consideró la renovación de la flota actualmente constituida por unidades Euro V para ser reemplazada por vehículos Euro VI o autobuses eléctricos (BEB)
- **Temporalidad:** se definen dos plazos para evaluar el proyecto:
 - 10 años con base en la actual política de renovación de flota de Metrobús
 - 15 años considerando la vida útil pronosticada para los autobuses eléctricos
- **Retiro / Vida útil:**
 - 10 años, es la política de renovación actual para autobuses diésel; para el caso de los eléctricos se calcula un precio de reventa acorde con la vida útil de 15 años
 - 15 años, tomando como referencia una mayor vida útil de los eléctricos. Para el caso de los vehículos diésel, se asume una sustitución que retira el primer vehículo al finalizar el año 10 y la adquisición de uno nuevo en el año 11; para el año 15 los autobuses diésel tienen un precio de reventa que refleja los cinco años restantes de operación.
- **Valor de reventa:** para ambos horizontes temporales, el valor de reventa de los vehículos, a diésel y eléctricos, se calcula a partir de la tasa de depreciación de 25% (para efectos fiscales), establecida con base en el numeral VI del artículo 34 de la Ley del Impuesto sobre la Renta (ISR) (Gobierno de México 2021).⁹

⁹ Con base en el artículo 34 de la Ley de Impuesto Sobre la Renta (LISR), para la adquisición de autobuses y sin distinción de su tecnología asociada, es posible contabilizar una depreciación acelerada de 25%; este mecanismo permite recuperar, fiscalmente, la inversión original durante los cuatro años posteriores a la adquisición.

Escenarios evaluados para el análisis de sensibilidad:

A partir de los horizontes temporales y las alternativas tecnológicas, se evalúan los escenarios para cada Línea presentados en la Tabla 5.

○ Actividad de los autobuses

- Variaciones: rango entre 150 km hasta los 350 km diarios de operación, variando por tramos de 10 km

○ Costo de infraestructura: este parámetro presenta gran variación en las fuentes consultadas¹⁰, es por ello que incorporamos 3 niveles de inversión en infraestructura de recarga para evaluar el impacto.

- MX\$ 0.6 millones / autobús - costo bajo
- MX\$ 1.6 millones / autobús - costo medio
- MX\$ 2.7 millones / autobús - costo alto

○ Consumo de energía eléctrica

- Consumo real base (derivado del monitoreo): 0.90 kWh / km (Línea 3)
- Consumo base + 30%: 1.2 kWh / km (Línea 3)

○ Precio de combustible y energía eléctrica

- Diésel: MX\$ 21.74 / L (promedio junio 2021)
- Electricidad: Se aplica la tarifa denominada Gran Demanda en Media Tensión Horaria (GDMTH), la cual aplica a servicios con una demanda igual o mayor a 100 kilowatts (CFE 2021), y se calcularon dos variaciones del precio con base en el intervalo horario en el que se realiza la carga de las baterías durante la noche o el día:
 - Tarifa base: MX\$ 0.97 / kWh; costo de energía cuando la carga se realiza entre 00:00 a 06:00 horas;
 - Tarifa intermedia: MX\$ 1.59 / kWh; costo de energía cuando la carga se realiza entre 06:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 horas.

¹⁰ La fuente de los costos de infraestructura, en sus tres niveles, son estudios realizados previamente para metrobús por distintos consultores; para los tres casos la fuente original de los costos de acometidas y subestaciones requeridas es la CFE.

A ambas tarifas horarias se agrega un costo fijo mensual y costos variables relativos a los conceptos de Distribución y Capacidad. La combinación de los consumos de energía de los autobuses y los niveles de las tarifas resultan en cuatro combinaciones que se aplicaron en el análisis de sensibilidad:

- Tarifa base consumo bajo (0.9 kWh / km): MX\$2.4 kWh/km
- Tarifa base consumo alto (1.2 kWh / km): MX\$3.2 kWh/km
- Tarifa intermedia consumo bajo (0.9 kWh / km): MX\$3.4 kWh/km
- Tarifa intermedia consumo alto (1.2 kWh / km): MX\$4.2 kWh/km

Tabla 5. Descripción de escenarios aplicados en análisis de sensibilidad

Tecnología	Costo de infraestructura	Consumo	Precio de combustible y electricidad (MX\$ / L) (MX\$ / kWh)	Costo de combustible (MX\$ / km) a 10 o 15 años
Diésel Euro VI	—	0.769 DLE / km (L3) 0.588 DLE / km (L4)	21.74 \$ / L	16.7 (L3) 12.8 (L4)
BEB¹¹	\$0.6 MX\$ mill / vehículo	0.90 kWh / km Base	0.97 \$ / kWh	2.57
			1.59 \$ / kWh	3.34
			0.97 \$ / kWh	3.42
			1.59 \$ / kWh	4.45
			0.97 \$ / kWh	2.57
			1.59 \$ / kWh	3.34
	\$2.7 MX\$ mill / vehículo	1.20 kWh / km Base + 30%	0.97 \$ / kWh	3.42
			1.59 \$ / kWh	4.45
			0.97 \$ / kWh	2.57
			1.59 \$ / kWh	3.34
			0.97 \$ / kWh	3.42
			1.59 \$ / kWh	4.45

Infraestructura de recarga

El costo de infraestructura de recarga es uno de los rubros que mayor variabilidad presentan, ya que las adecuaciones a la infraestructura eléctrica son muy particulares para cada proyecto y el costo por cargador depende del número de unidades que se requiera en el momento o a futuro. Para la evaluación de los tres escenarios de costos de infraestructura de recarga

¹¹ Para los autobuses eléctricos, en ambas líneas se aplican los escenarios de consumo base de 0.9 kWh/km y un consumo alto que se incrementa a 1.2 kWh/km (30% adicional al consumo base).

podimos obtener datos agregados por vehículo y los conceptos que integran este rubro.

En México la electricidad se distribuye en media tensión y corriente alterna. Es necesario un transformador para pasar de corriente alterna a corriente directa y se puedan cargar las baterías del autobús.

Tomamos como referencia el piloto de Línea 3 y 4 para las necesidades de infraestructura de recarga y costos asociados. Los componentes principales que se consideraron dentro de este estudio están basados en los pilotos de Metrobús, de Línea 3 a través de VEMO (antes Engie) y de Línea 4 a través de ABB, también se hicieron entrevistas a expertos del sector y se tomaron como referencia otras ciudades del proyecto ZEBRA.

Para la fase de la flota de diez autobuses eléctricos en operación en Línea 3 a partir de agosto 2021, se instalaron 7 cargadores de 150 kW con dos conectores tipo GB/T, todos con las mismas características y requieren en total una potencia de 1.05 MW (ZEBRA 2021). Para la siguiente fase del proyecto, en la que se integrarán 54 autobuses adicionales, se estima que la infraestructura de recarga requerirá alrededor de 5 MW de potencia. Se debe considerar para la expansión de la flota eléctrica, las características de las baterías del autobús, las características del sistema de recarga como la potencia, tipo de conectores, modo de comunicación, entre otros, para que pueda existir compatibilidad con las nuevas unidades y los sistemas de recarga.

A continuación, se describen los principales rubros:

- **Componentes técnicos:** La infraestructura de recarga se encuentra instalada en el patio de resguardo de los autobuses y se prevee en este mismo patio la posibilidad de instalar cargadores adicionales cuando la flota se renueve y se adquieran nuevas unidades eléctricas.
- **Transformador:** En la mayoría de los casos, es necesario un transformador de 1500 KVA cerca del depósito para adaptar la electricidad a baja tensión suministrada al patio de los autobuses donde se encuentran los cargadores.
- **Cargadores:** La tipología del cargador que actualmente se utiliza en Línea 3 tiene una potencia de 150 kW, que permite recargar la batería del autobús en 3.5 horas.

A nivel nacional, desde 2017, se aplica una deducibilidad de 30% al Impuesto sobre la Renta (ISR) para la adquisición de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos, en específico cuando se trata de electrolineras de acceso público.

- **Tarifa eléctrica:** Por el momento no existe una tarifa dedicada para la recarga de vehículos eléctricos, ni ningún incentivo a la tarifa eléctrica.

La estrategia de recarga principal es la de depósito y se realiza generalmente en la noche cuando el autobús se encuentra fuera de servicio. La tarifa eléctrica es “base” (Tabla 5), es decir la más económica, lo que sucede entre las 00:00 y 06:00.

- **Sistema de monitoreo remoto:** así como los autobuses cuentan con sistemas de telemetría de las marcas, los cargadores también son monitoreados constantemente de manera remota por parte de las plataformas de los fabricantes.

- **Costos administrativos:**

- Estudio técnico
- Instalación por parte de la CFE

ANÁLISIS DE FLOTA

ESTIMACIÓN DE EMISIONES

La estimación de las emisiones se realizó utilizando la herramienta TURBO, la cual calcula emisiones en función de la actividad anual de los autobuses, la eficiencia de tecnologías vehiculares y los sistemas de control de emisiones. De forma predeterminada TURBO utiliza los factores de emisión de escape contaminantes locales del Manual de factores de emisión para el transporte por carretera (HBEFA, por su sigla en inglés) que ya se ajustan a las condiciones reales de manejo (HBEFA 2019). En este análisis tomamos en cuenta los contaminantes locales óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$). La Tabla 6 muestra los factores de emisiones utilizados para estos contaminantes.

Tabla 6. Factores de emisión de escape por tecnologías vehicular para los contaminantes evaluados (HBEFA 2019)

Línea Metrobús	Estándar	NOx (g/km)	PM _{2.5} (g/km)
Línea 3 - Eje 1 Pte. Autobús 18m articulado	Euro V	7.19	0.10
	Euro VI	0.40	0.03
	BEB	0.00	0.00
Línea 4 - Buena Vista - Aeropuerto Autobús 12m	Euro V	5.86	0.08
	Euro VI	0.35	0.02
	BEB	0.00	0.00

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se calculan utilizando factores predeterminados—del pozo a la rueda (WTW, *well-to-wheel*)—específicos para cada tipo de combustible (Argonne National Laboratory 2020).

Para estimar las emisiones de los autobuses eléctricos, se consideró la matriz de fuentes de generación de electricidad a nivel país, como un valor aproximado de la matriz de generación de la Ciudad de México, se incluyen las emisiones del ciclo de vida de dicha energía y las pérdidas relativas a la transmisión.

RESULTADOS

COSTO TOTAL DE PROPIEDAD

Diferenciando para horizontes temporales de proyecto de 10 y 15 años, se presentan a continuación los resultados del análisis TCO para las Líneas 3 y 4, respectivamente (Tabla 7).

Tabla 7. Costo total de operación de Línea 3 en MX\$ (VPN¹²)

Costos	Euro VI a 10 años	BEB a 10 años	Euro VI a 15 años	BEB a 15 años
Adquisición del vehículo	8,453,548	12,067,594	11,273,595	12,287,762
Adquisición de la infraestructura	0	1,658,026	0	1,658,026
Combustible y aditivo (urea) Energía	9,989,396	1,707,386	13,361,301	2,237,764
Mantenimiento de media vida	1,841,139	2,399,191	2,271,007	2,757,810
Costos administrativos	2,825,733	2,825,733	3,497,846	3,497,846
Otros ¹³	321,902	291,179	398,467	360,437
Costo Total de Propiedad (% costo con respecto del autobús diésel)	23,431,718 (100%)	20,949,109 (89%)	30,802,216 (100%)	22,799,644 (74%)

Como se observa en la Figura 9, para la Línea 3 el TCO de la alternativa de autobuses eléctricos es menor para ambos escenarios de vida del proyecto; para el caso a 10 años, el costo de la unidad eléctrica representa un 89% del costo de la tecnología Euro VI a diésel, mientras que para el caso del proyecto a 15 años esta proporción se reduce a 74%. Dicha reducción se debe, principalmente, al ahorro en costos por consumo de la energía eléctrica en comparación con el costo incurrido por el consumo de diésel.

Así mismo, la diferencia entre costos de adquisición de vehículos se reduce al evaluar el proyecto a 15 años en comparación con el de 10 años; lo anterior con base en que el proyecto más largo se adquieren nuevos vehículos a diésel en el año 11 mientras que el vehículo eléctrico se mantiene y sólo se cuenta con el cambio a batería en el año 8.

¹² Valor presente neto

¹³ Otros costos incluyen los pagos anuales de tenencia, licencias y seguros.

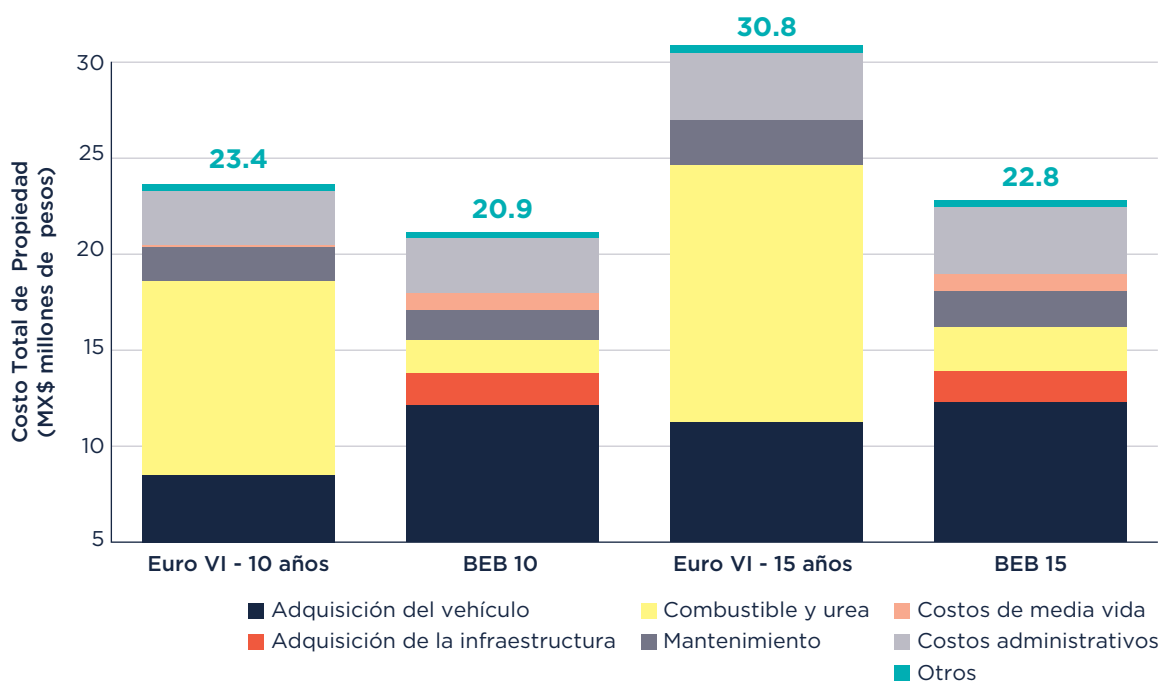


Figura 9. TCO Línea 3 en MX\$ (VPN)

A continuación, se presentan los resultados del análisis TCO para la Línea 4 de Metrobús, bajo las mismas características y escenarios (Tabla 8, Figura 10).

Tabla 8. Costo total de operación de Línea 4; precios descontados (MX)

Costos	Euro VI a 10 años	BEB a 10 años	Euro VI a 15 años	BEB a 15 años
Adquisición del vehículo	5,311,647	7,181,828	7,083,576	7,312,857
Adquisición de la infraestructura	0	1,658,026	0	1,658,026
Combustible y aditivo (urea) / Energía	10,716,603	2,390,341	14,333,975	3,132,870
Mantto. con costos de media vida	2,431,248	2,568,935	3,035,344	2,967,928
Costos administrativos	3,956,026	3,956,026	4,896,984	4,896,984
Otros	321,902	291,179	398,467	360,437
Costo Total de Propiedad (% costo con respecto del autobús diésel)	22,737,425 100%	18,046,334 79%	29,748,346 100%	20,329,101 68%

Al igual que el caso para la Línea 3, en la Figura 10, se observa que el TCO de la alternativa de autobuses eléctricos en Línea 4 es menor para ambos escenarios de período de proyecto a 10 y 15 años; para el período a 10 años, la unidad eléctrica tiene un costo que representa 21% menor al costo de la

tecnología Euro VI a diésel, mientras que para el caso del proyecto a 15 años es menor en 32%.

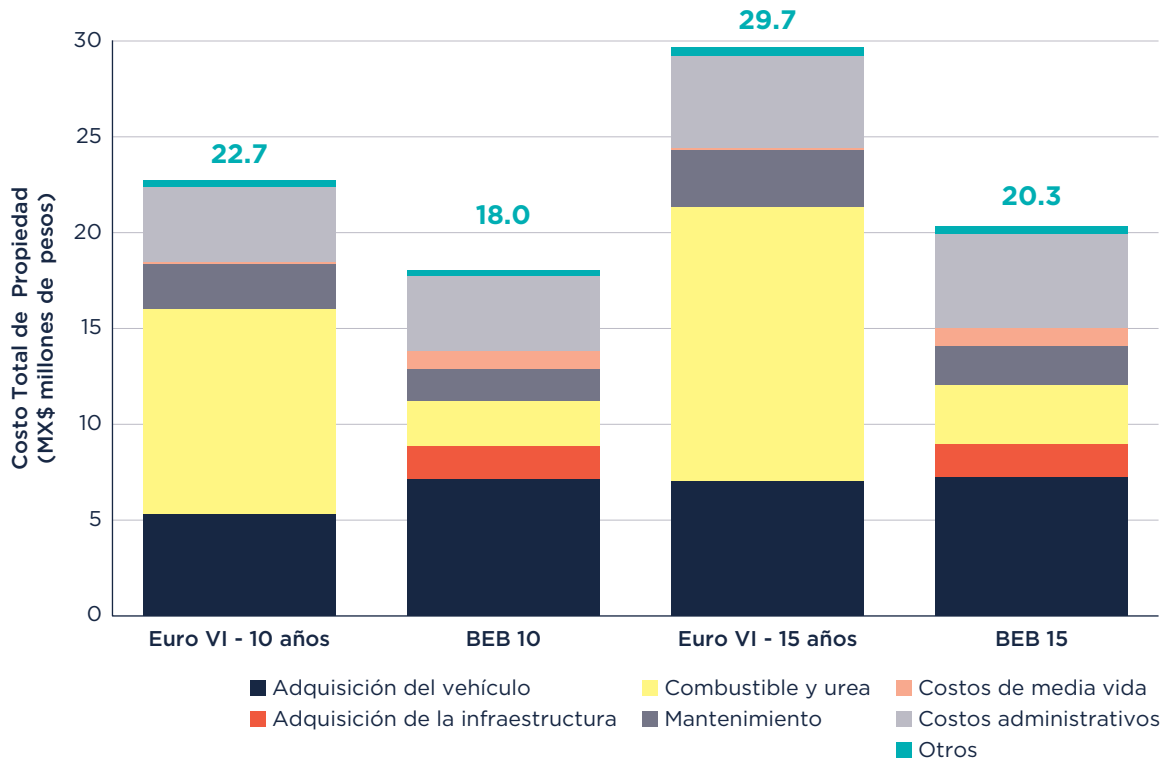


Figura 10. Costo total de operación de Línea 4 en MX\$ (VPN)

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para cada una de las cuatro combinaciones de tarifa eléctrica y consumo de energía se calculó el TCO de los autobuses eléctricos a distintos niveles de operación, en cada segmento de 10 km, dentro de un rango de 150 km a 350 km de recorrido por día; es decir, se calcularon 21 iteraciones para cada combinación.

Las combinaciones de tarifa de electricidad y consumo de energía se aplicaron a cada uno de los tres niveles de costos de infraestructura y a su vez, estos niveles, se aplicaron de manera diferenciada para proyectos con horizonte a 10 y 15 años.

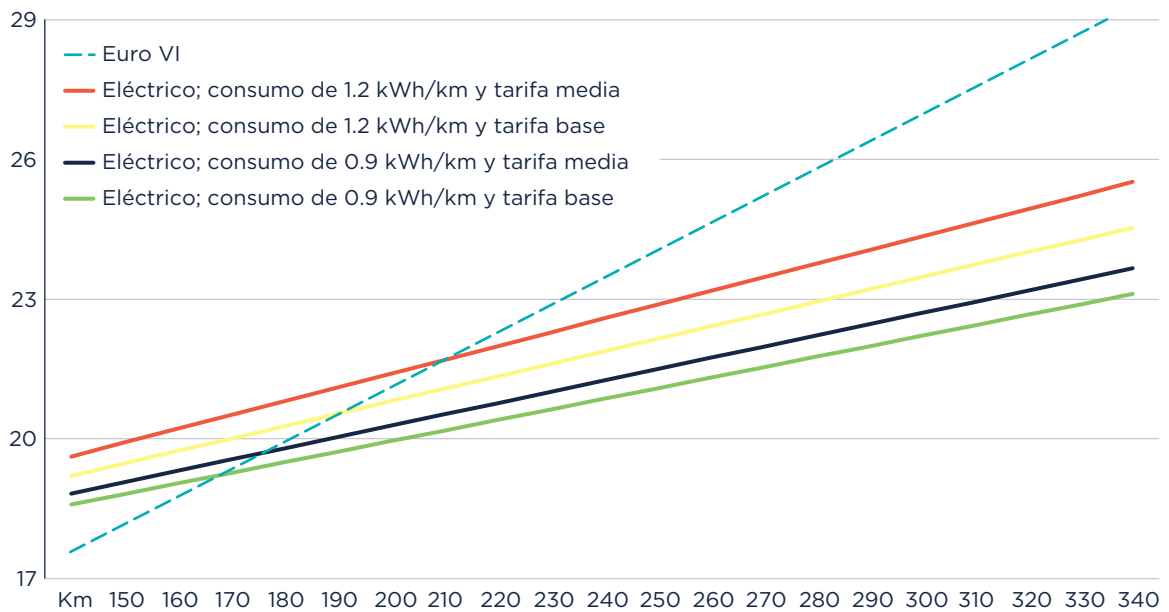


Figura 11. Análisis de sensibilidad para TCO de Línea 3 proyecto con horizonte temporal a 10 años; costo de infraestructura medio de MX\$1.6 millones.

La Figura 11, que presenta el segmento de costos medios del análisis de sensibilidad para la Línea 3 en un proyecto a 10 años, muestra que el TCO del autobús eléctrico es menor respecto a un autobús convencional a diésel a partir de los 210 km de recorrido diario. Esto significa que para los 245 km en promedio que tiene la Línea esto se encuentra superado. Para los otros escenarios que no mostramos gráfica, es decir, el de costo de infraestructura baja y alta, el punto de quiebre o paridad para la tarifa media y consumo de 1.2 kWh/km, se alcanza a los 180 km para el primer caso y 250 km en el segundo. Solo en el escenario del mayor costo de infraestructura de MX\$2.7 millones, el autobús eléctrico presenta un mayor TCO si consideramos el nivel de operación promedio diaria de 245 km.

Para una proyección a 15 años (Figura 12), el TCO del vehículo eléctrico es menor en cualquier escenario y para la totalidad del rango evaluado de distancia diaria recorrida.

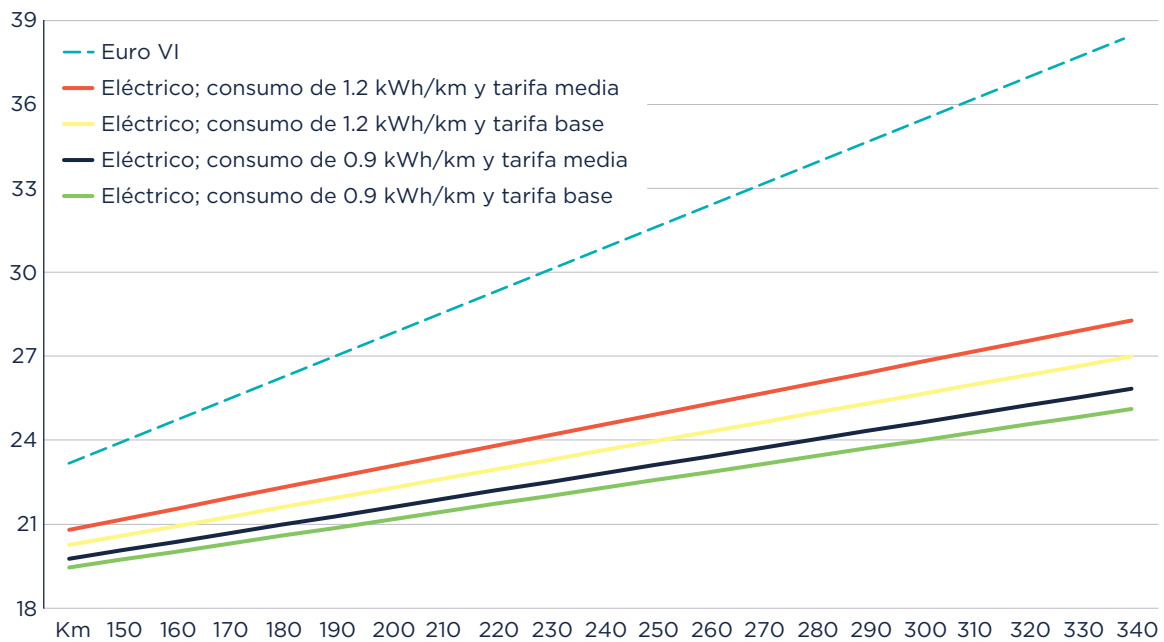


Figura 12. Análisis de sensibilidad para TCO de Línea 3, proyecto con horizonte temporal a 15 años; costo de infraestructura MX\$1.6 millones.

Este valor de recorrido mínimo para el punto de quiebre entre el autobús diésel y eléctrico nos sirve para poder contrastarlo con la capacidad de la batería. Con base en los datos de operación de la Línea 3, el recorrido máximo es de 325km al día. Tomando como referencia los datos preliminares del consumo real, una batería de 560 kWh estaría sobredimensionada 56% para esta requerimiento máximo con un consumo de 0.9 kWh/km. Para poder hacer este cálculo consideramos tanto el consumo de energía como el valor de reserva de la descarga de la batería del 20%. Si consideramos el consumo esperado de 1.4 kWh/km la capacidad de la batería sería ideal. Este ejercicio no pretende determinar el tamaño de la batería ideal pues como vemos depende de variables asociadas al desempeño, consumo energético y operación del autobús pero lo dejamos como una referencia para el TCO que se vería impactado por el tamaño de la batería. El tamaño de la batería lo debe determinar el fabricante u oferente con base en las características de operación de la ruta, nivel de servicio y el número de recorridos que realizan los autobuses.

La Figura 13 y Figura 14 muestran el análisis de sensibilidad para el costo total de operación de la Línea 4, proyectando a 10 y 15 años respectivamente. Similar a los resultados de la Línea 3, el TCO del autobús eléctrico es menor respecto a un autobús convencional a diésel, considerando cualquier

combinación de costos de infraestructura, tarifa y nivel de consumo de energía eléctrica a 15 años y a partir de los 215 km de recorrido diario para el caso a 10 años. Para el escenario de consumo alto de energía eléctrica, tarifa intermedia y un costo de infraestructura de MX\$2.6 millones (no se muestra gráfica), el TCO del vehículo eléctrico es menor a partir de los 280 km diarios a 10 años.

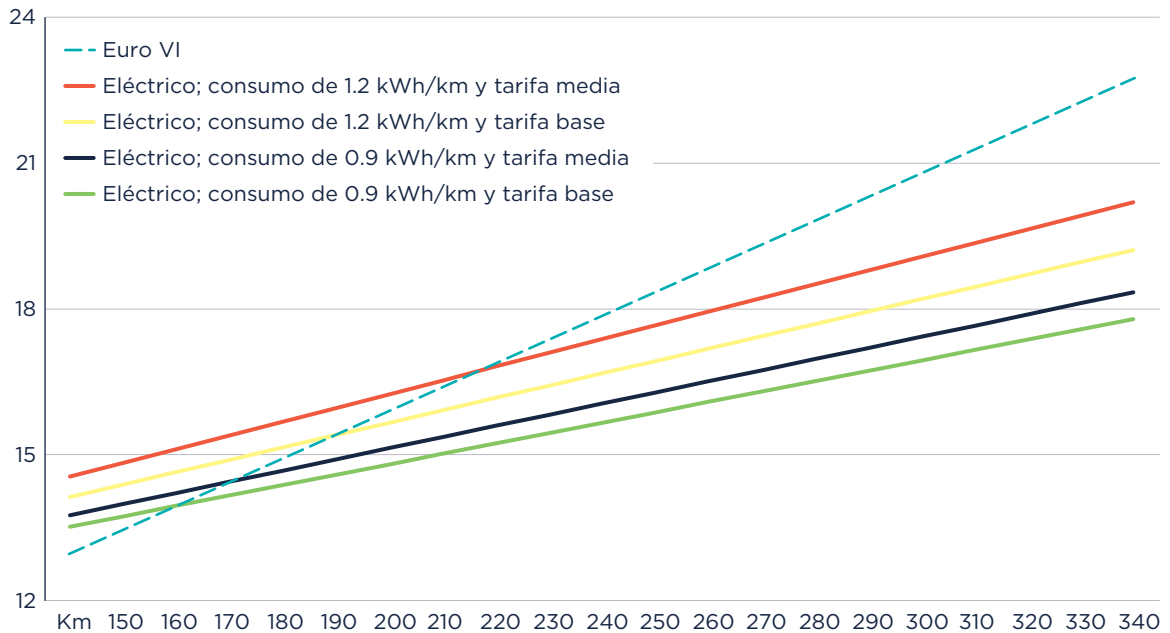


Figura 13. Análisis de sensibilidad para TCO de Línea 4 proyecto con horizonte temporal a 10 años; costo de infraestructura MX\$1.6 millones

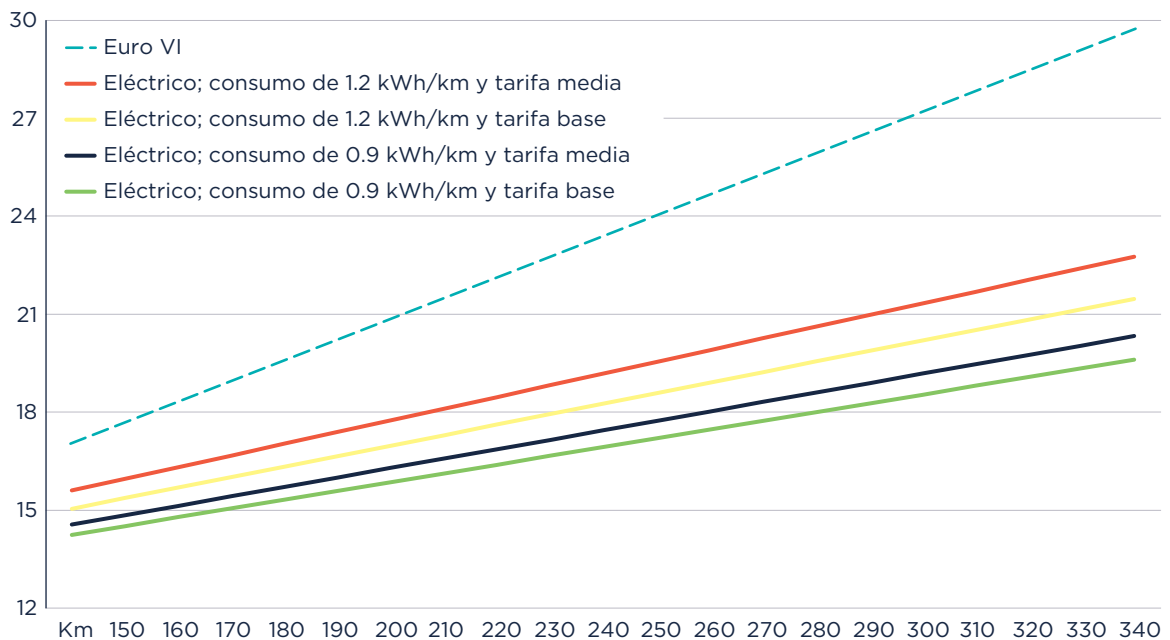


Figura 14. Análisis de sensibilidad para TCO de Línea 4 proyecto con horizonte temporal a 15 años; costo de infraestructura MX\$1.6 millones

EMISIONES

En esta sección se presentan las proyecciones de las emisiones de los dos escenarios de renovación tecnológica hacia vehículos Euro VI o eléctricos en comparación con la línea base que son autobuses Euro V.

Se hace la distinción entre las emisiones del pozo al tanque (WTT) y del tanque a las llantas (TTW), lo que permite tener un panorama completo de las emisiones de ciclo de vida del vehículo, centrándonos principalmente en el impacto ambiental de la operación de estos autobuses.

En el caso de una renovación por autobuses eléctricos las emisiones de CO₂ se reducen por dos factores: i) Mayor eficiencia de los motores eléctricos; y ii) dadas las metas de generación de energías limpias de México (SENER 2020), se espera que la matriz eléctrica incremente anualmente su proporción de fuentes de energía limpia, lo que reducirá gradualmente las emisiones WTT de CO₂, provenientes de la generación de la energía que utilizarán los autobuses en los próximos años.

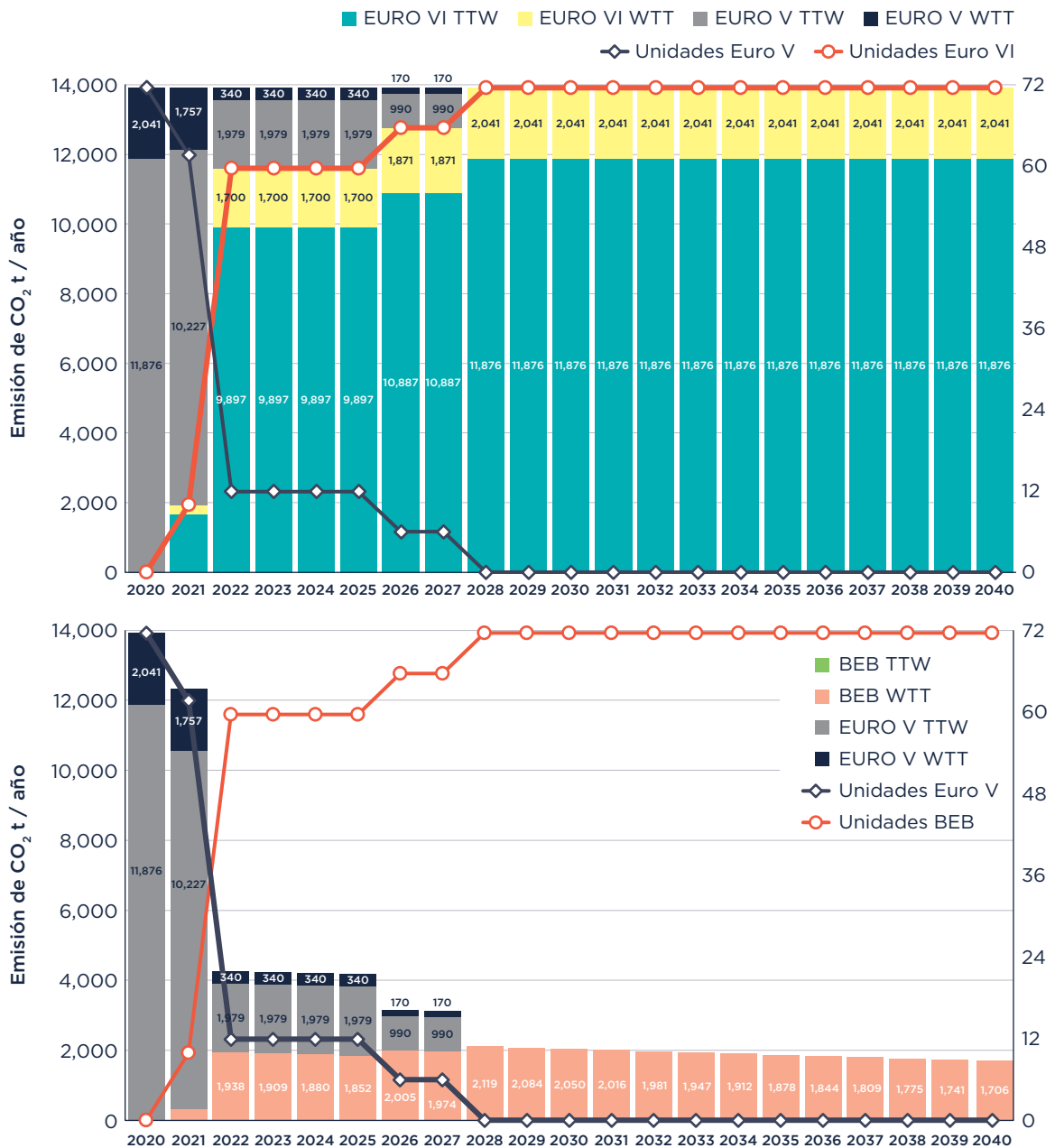


Figura 15. Proyección de emisiones (toneladas) GEI para la sustitución de autobuses en Línea 3 por tecnología Euro VI (panel superior) y BEB (panel inferior)

En el panel inferior de la Figura 15 se muestra la reducción de las emisiones de CO₂ incluyendo el número de vehículos de combustión interna renovados por eléctricos, con base en la política de renovación de Metrobús utilizada en este reporte. De 2020 a 2028, año en el que se electrifica la flota en su totalidad, las toneladas de CO₂ emitidas anualmente se reducen de 13 917 a 2 119, lo que representa un 85%; a partir de 2030 las emisiones WTT continúan disminuyendo por la mayor proporción de energías renovables utilizadas en la

generación de electricidad, alcanzando una emisión anual de 1 706 t de CO₂ en 2040, que representa una disminución de 88% respecto a 2020.

Si la renovación de las autobuses Euro V se realiza con autobuses Euro VI, las emisiones de CO₂ no se modifican, debido a que se asume igual eficiencia en el uso de combustible (Figura 15 panel superior).

Estos resultados presentan un escenario optimista y acelerado en la adopción de tecnologías libres de hollín o cero emisiones, ya que se renuevan las unidades que han llegado a su vida permitida en el sistema en los primeros años. Hemos visto en la implementación de los pilotos que aún quedan algunos temas pendientes por consolidar tanto técnicamente como financieramente. Sin embargo, el aprendizaje de los mismos permite informar y sentar las bases de la electrificación del sistema conforme su calendario y así aprovechar las ventajas ambientales, energéticas y sociales de los vehículos más limpios.

En cuanto a las emisiones locales, las proyecciones de NOx por la renovación de la flota se presentan en la Figura 16. Estas emisiones utilizaron factores de TTW donde los autobuses eléctricos presentan cero emisiones y por lo tanto no se muestran en la gráfica. En el caso de una sustitución de autobuses con tecnología Euro VI, las emisiones de NOx se reducen en un 94%, pasando de 41.4 toneladas por año, al inicio del proyecto, a 2.3 toneladas anuales cuando se alcanza la renovación total de la flota.

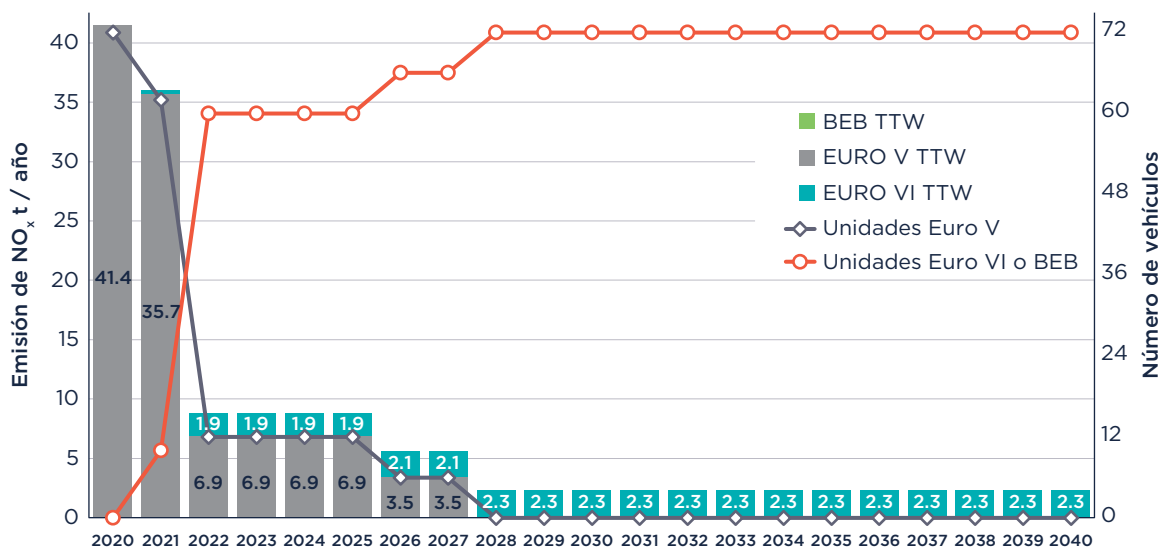


Figura 16. Proyección de emisiones de NOx (toneladas) para la sustitución de autobuses en Línea 3 por Euro VI y BEB

En el caso de las partículas finas (Figura 17), es posible apreciar el gran cambio tecnológico de pasar de Euro V a Euro VI mediante el uso de filtros de partículas diesel (DPF). Los sistemas avanzados de control de emisiones de los vehículos Euro VI requieren diesel de ultra bajo contenido de azufre (< 15 ppm), con el cual se cuenta dentro del sistema. Las emisiones de PM2.5 al inicio del proyecto suman 0.59 toneladas anuales y, al completar la sustitución con autobuses Euro VI, se reducen hasta 0.18 toneladas por año, lo que representa una disminución de 70%.

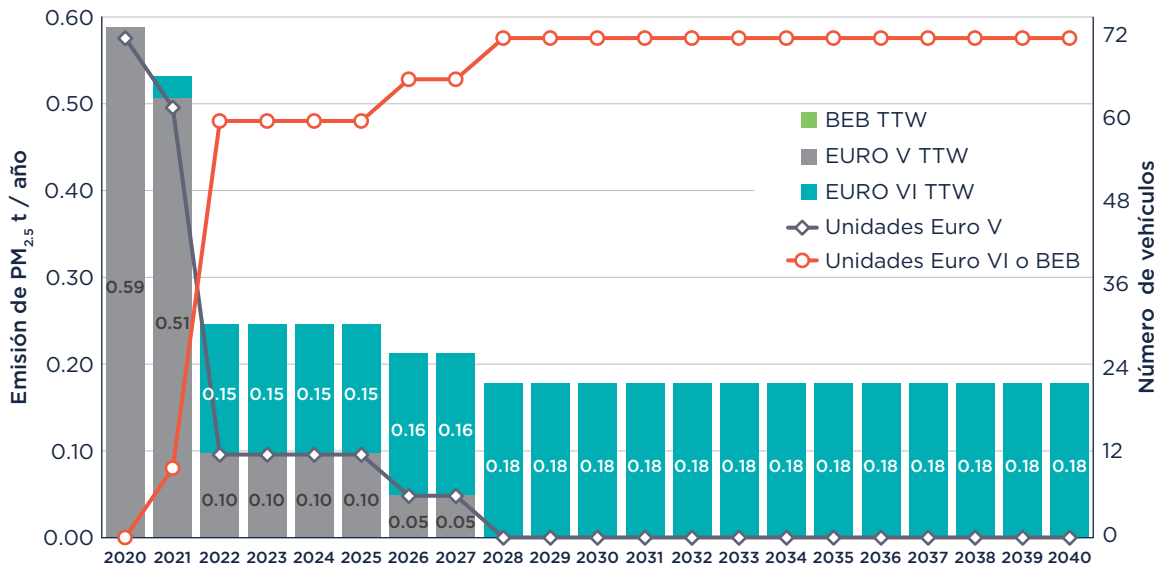


Figura 17. Proyección de emisiones de PM2.5 (toneladas) para la sustitución de autobuses en Línea 3 por Euro VI y BEB

De manera análoga se presentan los resultados para la Línea 4 que, al igual que en la Línea 3, las reducciones de emisiones de GEI se obtienen solo en el caso de transicionar a autobuses eléctricos, pasando de una emisión anual de 10 539 t CO₂ en 2020 a 2 099 en 2028, reducción de 80%, cuando se renueve el total de las unidades de la flota y, asumiendo el cumplimiento de las metas de generación de energías limpias en México, las reducciones de CO₂ en la Línea se estiman 1690 a 2040, lo que representa una reducción de 84%.

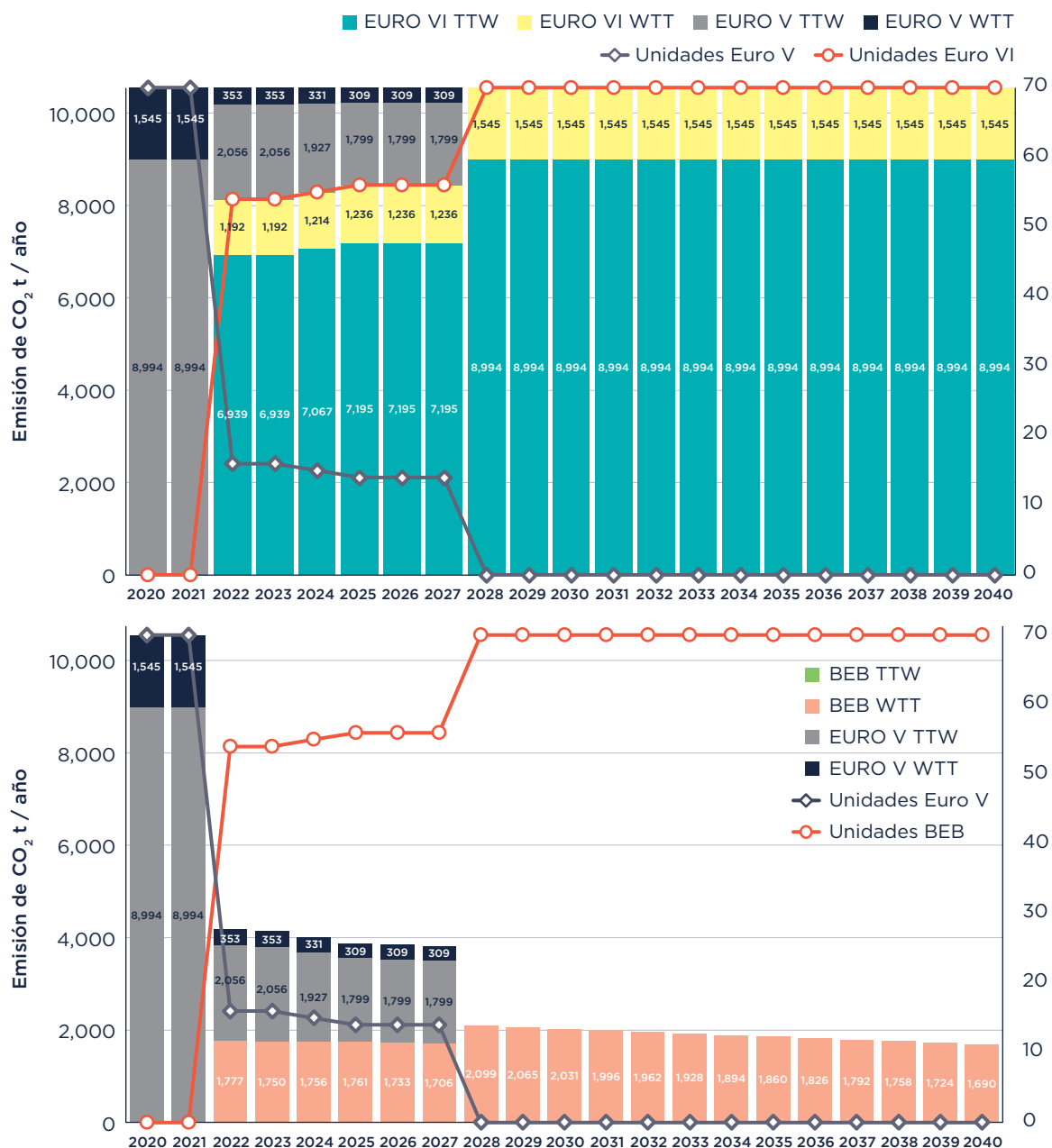


Figura 18. Proyección de emisiones (toneladas) GEI para la sustitución de autobuses en Línea 4 por tecnología Euro VI (panel superior) y BEB (panel inferior)

En el caso de las emisiones locales de NO_x y $\text{PM}_{2.5}$ se ve drásticamente el impacto del uso de DPF que, en un caso menos favorable, se recomienda la sustitución de las unidades por vehículos Euro VI; sin embargo, los vehículos eléctricos siguen siendo la mejor opción al eliminar las emisiones de contaminantes locales un su totalidad.

En el caso de los óxidos de nitrógeno, es claro que los vehículos Euro V tienen emisiones muy superiores a los Euro VI, ya que se alcanza una disminución de

94% cuando se complete la sustitución de la flota, pasando de una emisión de 33.4 a 2.0 toneladas anuales en dicho periodo; reducir estos contaminantes es clave porque son uno de los precursores de ozono, el cual es causa de la mayoría de las contingencias en la ciudad (Figura 19).

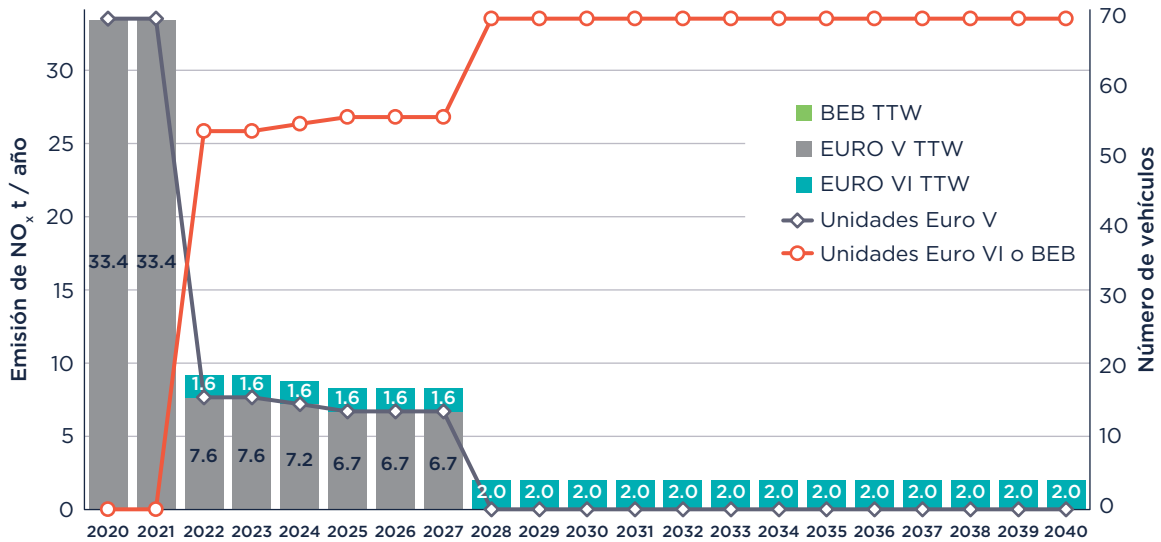


Figura 19. Proyección de emisiones (toneladas) de NOx para la sustitución de autobuses en Línea 4 por Euro VI y BEB

La reducción de emisiones de PM2.5 en línea alcanzará un 73%, al pasar de 0.46 toneladas por año al inicio del proyecto a 0.12 cuando se realice la sustitución de la totalidad de las unidades (Figura 20). Es también importante destacar el beneficio de transitar hacia una tecnología Euro VI, pero siempre considerar que la única opción de eliminar por completo las emisiones locales es la sustitución por vehículos eléctricos.

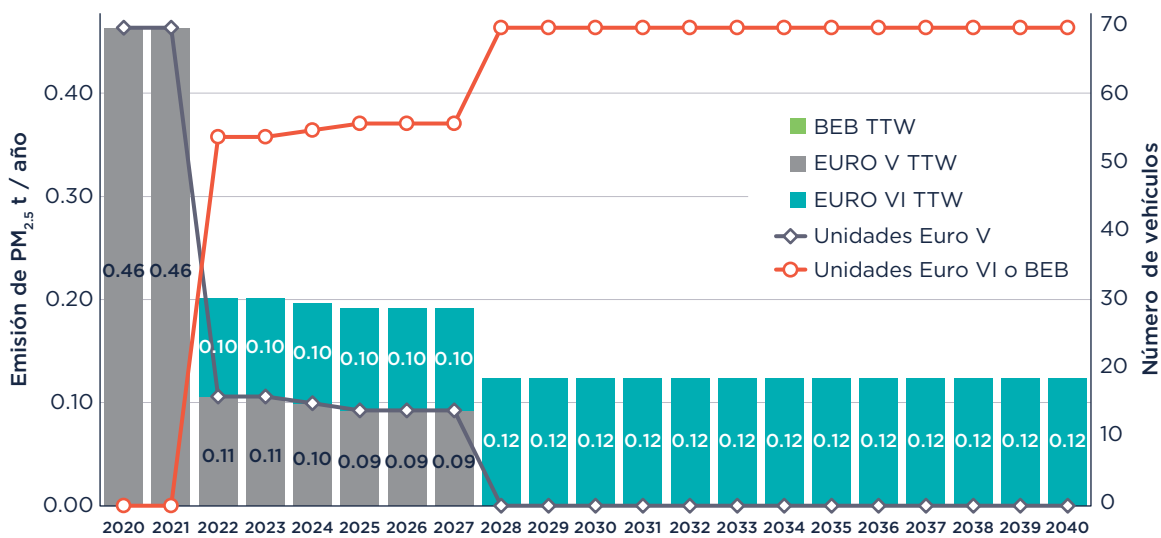


Figura 20. Proyección de emisiones (toneladas) de PM2.5 para la sustitución de autobuses en Línea 4 por Euro VI y BEB

CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA/PENDIENTE


La visión de corto y mediano plazo de Metrobús de electrificar todas sus líneas actuales y la nueva Línea 8—Circuito Cero, es la decisión correcta que contribuirá oportunamente a los planes de neutralidad en carbono de la ciudad.

Para apoyar esta visión se evaluaron las opciones de electrificación de la Línea 3 y 4 de Metrobús. Este reporte pudo confirmar lo que otras ciudades ZEBRA en América Latina y otras alrededor del mundo han demostrado: que los autobuses eléctricos son una alternativa viable para la renovación de la flota diésel, no sólo desde un punto de vista económico, sino también por la reducción de contaminantes locales y climáticos.

La recomendación de estrategia de despliegue de flota de Metrobús (factible técnicamente) es que pueda renovar todas sus siguientes unidades programadas para sustitución (65% de su flota al 2030) con autobuses eléctricos; tanto la Línea 3 y 4 tendrían que sustituir el 100% en ese mismo año.

Se analizaron para cada línea distintos recorridos en las rutas, costos de infraestructura, tarifas de electricidad, vida permitida de operación de los autobuses (10 y 15 años) y consumo energético de los vehículos; así se definieron las condiciones mínimas bajo cada escenario donde los vehículos eléctricos cumplen con un TCO menor al de los convencionales, como sucede en la mayoría de los casos.

El análisis de TCO encontró para la Línea 3 que el plan de sustitución de vehículos diésel hacia eléctricos puede ser 1 a 1, siendo éste 11% menor dentro de un periodo de 10 años y 26% para un periodo de 15 años. Análogamente para la Línea 4, este costo fue 21% menor dentro de una evaluación a 10 años y 32% para 15 años. Se incluyeron análisis de sensibilidad para estimar el impacto de algunas de las variables con mayor incertidumbre como el costo de infraestructura, consumo de energía (kWh/km), tarifas eléctricas (MX\$/kWh) para carga nocturna y carga de oportunidad durante el día, todo lo anterior bajo dos escenarios de tiempo a 10 y 15 años. Para todas las combinaciones, incluyendo los costos más altos para estas variables, los autobuses eléctricos siguen siendo la mejor opción si la operación diaria es igual o mayor que los recorridos diarios promedios de cada línea.




Este reporte además pudo ser complementado con datos reales de operación de los pilotos de autobuses eléctricos que ha implementado Metrobús con distintos actores, lo que ayudó a mejorar las estimaciones y modelos implementados y es la base para estudios futuros. Desde un punto de vista técnico los pilotos han presentado buenos resultados sobre el desempeño de los autobuses eléctricos, sin embargo, se debe continuar el seguimiento de los pilotos para tener más certeza del consumo de combustible ante distintos escenarios de operación y el consumo de energía de sus accesorios. ICCT espera colaborar con Metrobús y MIVSA en el corto plazo en un ejercicio de lastre que podrá responder a estas preguntas.

Para llevar a cabo esta transformación tecnológica se requiere de nuevos modelos de negocio y financieros que permitan implementar esta renovación. La asociación con nuevos actores, la separación de propiedad de los activos y operación (batería, carrocería, autobús eléctrico, mantenimiento, etc.) y otros modelos de financiamiento (e.g. arrendamiento) son necesarios para poder renovar desde 2022 todos los autobuses que se encuentren al final de su operación permitida. Además, con el tiempo y el escalamiento de proyectos de electromovilidad, aunado a una mayor certeza en los mercados, aumentarán las inversiones y la demanda de vehículos eléctricos, así como de su infraestructura asociada, disminuyendo sus costos.

Una de las recomendaciones del estudio es incrementar la vida de operación permitida de los autobuses eléctricos de 10 a 15 años. Y en un escenario de flexibilidad para lograr la renovación exclusivamente con vehículos eléctricos, es que se pudieran extender por uno o dos años la vida de operación permitida de los vehículos diésel para que la renovación pueda ser por un vehículo eléctrico ya que estamos hablando de una década para poder tener esta oportunidad de nuevo.

Sobre los temas que requerirán mayor atención es la infraestructura de recarga; la CFE de la mano con otras entidades de gobierno como SEMOVI, Secretaría de Economía (SE), empresas de energía y operadores de proyectos de electromovilidad deben trabajar para incrementar las capacidades del sistema, dimensionar la demanda futura de los proyectos en toda la ciudad y desarrollar esquemas de tarifas que consideren los proyectos de electrificación de transporte público, los cuales no existen por el momento para ningún tipo de flota en la CDMX. Si bien por el momento, se realizan estrategias de recarga nocturna en patio, pudimos comprobar que bajo algunos escenarios donde se




modelaron tarifas de día, el TCO de los autobuses eléctricos sigue siendo más barato que las unidades diésel bajo condiciones de recorridos mínimos. Así que se recomienda hacer un análisis más detallado de la operación de la ruta para poder identificar el mejor esquema de planeación, operación y recarga de la flota.

En este reporte nos enfocamos en las dos primeras líneas de Metrobús en tener pilotos de electrificación, pero sin duda es factible el plan de electrificación de todo el sistema y las lecciones aprendidas de estos pilotos, los datos de monitoreo, evaluación de operación real, los procesos de adquisición, mantenimiento, estrategias de recarga, son elementos clave para la expansión de este plan a las otras líneas del sistema.

REFERENCIAS

- Argonne National Laboratory. 2020. "Alternative Fuel Life-Cycle Environmental and Economic Transportation (AFLEET) Tool." March 2, 2020. <https://greet.es.anl.gov/index.php?content=afleet>.
- C40. 2017. "Nuestro Compromiso Con Calles Verdes y Saludables. Declaración de C40 Por Unas Calles Libres de Combustibles Fósiles." https://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other_uploads/images/1420_SPA_Fossil_Fuel_Free_Streets_Declaration.original.pdf?1508742685.
- C40 CFF. 2018. "Análisis de buses eléctricos para el corredor cero emisiones Eje 8 Sur." https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/2CVq9EIOehKvFJbJWd14QH_ZghxABGbYPCyaYS16s.pdf.
- CFE. 2021. "Tarifa Gran demanda en media tensión horaria." Comisión Federal de Electricidad CFE. October 17, 2021. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>.
- Congreso de la Ciudad de México. 2014. "Ley de Movilidad de La Ciudad de México." Ciudad de México. <https://www.congresocdmx.gob.mx/media/documentos/6299c5bdd0df4f6da6e540ab8613d2682b7d738b.pdf>.
- Cui, Hongyang, Pramoda Gode, and Sandra Wappelhorst. 2021. "A Global Overview of Zero-Emission Zones in Cities and Their Development Progress." Briefing. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/global-cities-zez-dev-EN-aug21.pdf>.
- Dallmann, Tim. 2019. "Climate and Air Pollutant Emissions Benefits of Bus Technology Options in São Paulo." Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/climate-and-air-pollutant-emissions-benefits-bus-technology-options-sao-paulo>.
- Dallmann, Tim, Oscar Delgado, Lingzhi Jin, Ray Minjares, Ravi Gadepalli, and Christy Ann Cheriyan. 2021. "Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Route-Level Energy Consumption and Driving Range Analysis." Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation.
- Gobierno de la Ciudad de México. 2019a. "Programa Ambiental y de Cambio Climático Para La Ciudad de México 2019-2024." Ciudad de México. <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/storage/app/media/pdf-programa-de-medio-ambiente-y-cambio-climatico-uv.pdf>.
- . 2019b. "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>.
- Gobierno de México. 2021. "Ley Del Impuesto Sobre La Renta." Diario Oficial de la Federación. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LISR_310721.pdf.
- HBEFA. 2019. "Handbook Emission Factors for Road Transport." HBEFA v 4.1. August 31, 2019. <https://www.hbefa.net/e/index.html>.

- Jefatura de Gobierno. 2021. “Decreto Por El Que Se Abroga La Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable Para La Ciudad de México Publicada En La Gaceta Oficial Del Distrito Federal El 16 de Junio de 2011 y Se Expide La Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable de La Ciudad de México.” Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/1c71cebddd564d1cf580b0e36e7de4802.pdf?fbclid=IwAR0Yka7dsqWyr51DI_IP_Cm5BfXmes7enSZukYZalwUEuRhRT302IO9hcr0.
- Jin, Lingzhi, Oscar Delgado, Ravi Gadepalli, and Ray Minjares. 2020. “Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Development of Real-World Drive Cycles to Simulate Zero-Emission Technologies along Existing Bus Routes.” Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/zev-bus-fleets-dev-drive-cycles>.
- Presidencia de la República. 2020. “Decreto Por El Que Se Modifica La Tarifa de La Ley de Los Impuestos Generales de Importación y de Exportación.” Ciudad de México. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5599614&fecha=03/09/2020.
- Secretaría de Movilidad. 2020. “Programa Integral de Movilidad de La Ciudad de México 2020-2024: Diagnóstico Técnico.” Ciudad de México. <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/diagnostico-tecnico-de-movilidad-pim.pdf>.
- Secretaría del Medio Ambiente. 2018. “Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016.” Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente; Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/inventario-emisiones-2016.pdf>.
- . 2021. “Estrategia Local de Acción Climática 2021-2050. Programa de Acción Climática 2021-2030.” Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). Gobierno de la Ciudad de México. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/PACCM-y-ELAC.pdf.
- SEMARNAT. 2021. “ACUERDO por el que se modifica la vigencia del periodo establecido en las notas al pie de las tablas 1, 2 y 4, de los numerales 4.1 y 4.2, únicamente en lo que se refiere a los Estándares AA, de la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017.” Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5636495&fecha=26/11/2021.
- SEMOVI. 2020. “Segundo Informe Anual, Agosto 2019 - Julio 2020.” Secretaría de Movilidad, Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/segundo-informe-anual-semovi>.
- SENER. 2020. “Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios.” Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020.
- . 2021. “Tercer Informe de Labores 2020 - 2021. Secretaría de Energía.” <https://base.energia.gob.mx/IL/3-Informe-de-labores-SENER.pdf>.



Verónica Garibay Bravo, and Katherine Blumberg. 2021. “La Verdad Sobre La Contaminación de Los Vehículos Diésel.” Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/mexico-hdv-fs-feb2021>.

ZEBRA. 2021. *Grupo de Trabajo I La Experiencia Metrobús*. MP4. Grupo de Trabajo Regional ZEBRA. Ciudad de México. <https://app.box.com/file/877080346774?sb=/activity>.

CONTACTO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org



SOCIO DE APOYO



AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES

