

Resultados del piloto de buses eléctricos en Buenos Aires

Tecnologías alternativas en el transporte público

Resultados del piloto de buses eléctricos en Buenos Aires

**Tecnologías alternativas
en el transporte público**

Título:

Resultados del piloto de buses eléctricos en Buenos Aires
Tecnologías alternativas en el transporte público

Depósito legal: DC2021000135

ISBN: 978-980-422-210-8

Editor:

CAF

Vicepresidencia de Infraestructura

Autores:**Equipo Inicio**

Patrick Maio

Ana Ángel

Nathalia Ortiz

Equipo Sistemas Sustentables

Sebastián Herrera

William Vidal

Equipo CAF

Angie Palacios

Andrés Alcalá

Alejandro Miranda

Diseño gráfico: Estudio Bilder

Esta y otras publicaciones se encuentran
disponibles en scioteca.caf.com

© 2021 Corporación Andina de Fomento
Todos los derechos reservados

Contenido

Reconocimientos — 9

1/Resumen ejecutivo — 10

Evaluación técnica y operativa — 10

Evaluación económica — 12

Evaluación ambiental — 13

Revisión de mejores prácticas — 14

Recomendaciones — 14

Conclusiones — 15

2/Objetivos — 16

3/Antecedentes — 17

4/Evaluación técnica — 18

Resultados de la evaluación técnica — 18

Recomendaciones a nivel técnico — 25

5/Evaluación operativa — 28

Resultados de la evaluación operativa — 28

Recomendaciones a nivel operativo — 29

6/Evaluación económica — 33

Resultados de la evaluación de factibilidad económica — 33

Recomendaciones a nivel económico — 36

7/Evaluación ambiental — 40

Resultados del monitoreo — 40

Recomendaciones a nivel ambiental — 43

8/Revisión de las mejores prácticas en proyectos de buses eléctricos — 46

9/Cobeneficios — 49

10/Riesgos — 50

11/Recomendaciones — 51

Aspectos particulares a considerar en el momento de la adquisición — 51

Aspectos técnicos — 52

Aspectos de gestión de la operación — 52

Aspectos económicos — 53

12/Conclusiones — 54

13/Bibliografía — 56

Anexo — 58

Cuadros

- Cuadro A.** Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad para la comparación de costos diferenciales entre una flota eléctrica y una a diésel (8 buses) — 13
- Cuadro 1.** Principales factores que afectan el consumo de energía — 20
- Cuadro 2.** Variables operativas relevantes del monitoreo — 28
- Cuadro 3.** Medidas de contingencia propuestas para días de mayor consumo — 30
- Cuadro 4.** Resultado de la evaluación de factibilidad financiera en el escenario base para una flota de 8 buses en un periodo de 16 años — 34
- Cuadro 5.** Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad para el comparativo de costos diferenciales entre una flota eléctrica y una diésel (8 buses) — 34
- Cuadro 6.** Tarifas eléctricas de Edesur — 37
- Cuadro 7.** Diferencias por cambio de contrato de potencia — 38
- Cuadro 8.** Emisiones de gases contaminantes evitadas por 2 autobuses eléctricos en los 10 meses de operación — 41
- Cuadro 9.** Emisiones de gases contaminantes evitadas por una flota de 8 buses eléctricos durante 16 años — 41
- Cuadro 10.** Recomendaciones para el desarrollo de mercados secundarios de baterías en Argentina — 45
- Cuadro 11.** Mejores prácticas en proyectos de buses eléctricos — 46

Figuras

- Figura 1.** Trazado para el circuito corto (naranja) y el complemento que define el circuito largo (azul) — 17
- Figura 2.** Esquema de descarga de la batería en cada vuelta, considerando la operación específica de la línea participante en el proyecto — 29
- Figura 3.** Zonas con riesgo de explosión, según la norma argentina AEA — 31
- Figura 4.** Ciclo de vida de una batería de vehículo eléctrico — 44

Gráficos

Gráfico 1. Consumo específico promedio de energía para cada bus bajo seguimiento — 19

Gráfico 2. Consumo energético proyectado por el modelo para distintos escenarios de las variables independientes consideradas: velocidad, cantidad de pasajeros y temperatura — 22

Gráfico 3. Energía recuperada respecto a la energía total utilizada por cada bus — 23

Gráfico 4. Autonomía estimada para cada bus — 24

Gráfico 5. Diferencial de costos por tecnología según el resultado de la evaluación de factibilidad financiera en el escenario base — 35

Gráfico 6. Comparación de costos por kilómetro para buses eléctricos y buses diésel — 35

Gráfico 7. Emisiones de CO₂e asociadas con los 2 buses en seguimiento en los 10 meses de operación en comparación con emisiones de buses diésel — 42

Gráfico 8. Nivel de ruido en el exterior del bus a velocidad constante — 42

Reconocimientos

El Programa de Prueba Piloto de Buses de Combustibles Alternativos se creó en el marco del Plan de Movilidad Limpia del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. Su objetivo era evaluar la viabilidad técnica, operativa, económica y ambiental de los buses de bajas emisiones y analizar la escalabilidad de las tecnologías. El programa incluyó la prueba piloto de buses impulsados por biodiésel, gas natural comprimido (GNC) y electricidad. En este documento se exponen los resultados de la Prueba Piloto de Buses Eléctricos, que se llevó a cabo durante el año 2019 y 2020 y realizada con los buses 100 % eléctricos pertenecientes al grupo Colgas, durante sus operaciones en la línea 59.

Gracias al financiamiento de CAF, se realizó un monitoreo de los buses, con el que se obtuvieron datos sólidos que permitieron describir, analizar y evaluar la operación de dichos vehículos. Además, se realizó un análisis económico comparativo con la tecnología diésel y se desarrollaron diferentes escenarios con el objetivo de estudiar la incorporación de más buses a la flota. Esta prueba piloto acortó la distancia que existe entre las tecnologías limpias y el sistema de colectivos que opera actualmente. El proyecto permitió el acercamiento a lo desconocido y la experimentación de primera mano de la operación de estos buses en la ciudad de Buenos Aires. Es el primer capítulo de un camino hacia la descarbonización del sistema de transporte público. La prueba piloto fue consecuencia de un esfuerzo colaborativo entre el sector privado, los operadores de las líneas y el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. El rol del Gobierno fue enmarcar esta prueba en una prueba piloto oficial y facilitar algunos incentivos para que tuviera lugar. Sin embargo, esto no hubiese sido posible sin los buses puestos a disposición por Colgas, la operación de la línea 59 y el monitoreo por parte de CAF, junto con Inicio y Sistemas Sostenibles.

Es oportuno agradecer y mencionar a todo el equipo interdisciplinario e intersectorial que se formó para poder realizar este piloto. El equipo se caracterizó por superar adversidades e imprevistos y mantener el entusiasmo desde el principio hasta el fin. La producción de este informe se ha tomado con suma seriedad y responsabilidad, como merece un tema tan importante para el mundo como es la electromovilidad.

1/ Resumen ejecutivo

El objetivo principal de este estudio es analizar la factibilidad técnica, operativa, económica y ambiental de los buses eléctricos en Buenos Aires. El análisis se basa en el monitoreo de la operación en condiciones reales de dos unidades que circularon en el sistema de transporte público de esta ciudad desde el 17 de mayo de 2019 hasta el 16 de mayo de 2020. A continuación se resumen los principales resultados.

Evaluación técnica y operativa

Consumo de energía

El consumo de energía de los buses bajo seguimiento fue obtenido con base en los registros del estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) y del odómetro realizados por los mismos conductores al inicio y fin de cada viaje. El consumo promedio para ambos buses durante todo el periodo fue de 1,01 kWh/km. El consumo final de energía depende de la eficiencia del cargador y las baterías. La literatura en la materia indica que estos elementos en conjunto tienen una eficiencia del orden del 82 % al 92 %. En esta experiencia se obtuvo un valor similar.

Los principales factores que afectan el consumo de energía son:

Uso de sistemas auxiliares y temperatura. Existe relación entre las temperaturas y el uso de estos sistemas. En los meses más fríos se incrementa el consumo por el dispositivo de deshielo, y en los meses más cálidos por el de aire acondicionado (A/C). El valor máximo de consumo por deshielo ascendió a un 12,1 % de la energía cargada en un mes, mientras que para el A/C el valor máximo registrado fue del 9,3 %. Se observan diferencias significativas entre los consumos de un bus y

otro para un mismo periodo, lo cual refleja la importancia de capacitar a los conductores en el uso apropiado de estos elementos o evaluar una solución tecnológica que gestione su uso.

Cantidad de pasajeros transportados. Se observa una tendencia a incrementar el consumo energético a medida que aumenta la cantidad de pasajeros transportados. La mayor cantidad de pasajeros representa un mayor peso que debe mover el vehículo, incrementando la demanda energética. También aumenta la carga térmica, haciendo necesario el uso de aire acondicionado.

Velocidad media. Se puede apreciar en ambos buses una tendencia a reducir el consumo de energía cuanto mayor es la velocidad. Esto se puede atribuir a que una mayor velocidad media para un mismo recorrido representa menor cantidad de episodios de frenado, en los cuales se pierde energía.

Con base en información real de este proyecto, se desarrolló un modelo matemático que permite realizar proyecciones de manera cuantitativa sobre cómo influye cada una de estas variables en el consumo de energía.

Freno regenerativo

La recuperación de energía gracias a este dispositivo asciende a un 43 % respecto a la energía total necesaria para el desplazamiento. La recuperación depende, al menos en parte, del estilo de conducción.

Autonomía

La autonomía puede variar significativamente a lo largo del año, teniendo en este proyecto un valor máximo observado un 33 % mayor que el mínimo. Estas variaciones sugieren la necesidad de mantener un monitoreo permanente, con el fin de reducir los riesgos de no disponer de la energía suficiente para completar un viaje y retornar al punto de carga de energía. Se debe notar que para efectuar la operación normal no basta con conocer la autonomía promedio, sino que se deben establecer criterios para asegurar la operación todos los días, instaurando medidas de contingencia para días de mayores consumos que lo habitual.

Las menores autonomías observadas durante el periodo de monitoreo fueron de 223 km y 195 km para los Buses 1 y 2, respectivamente. Esta diferencia puede atribuirse, al menos en parte, a la forma de conducción, lo que da cuenta de la necesidad de dar capacitación¹ a los conductores. El monitoreo permanente permitirá focalizar estas instancias.

Durante el periodo en que se efectuó solo una carga nocturna, se observaron días en que no fue posible completar la operación normal. En el caso del Bus 1 esto ocurrió en un 5 % de los viajes y para el Bus 2, en un 25 %. En todos los casos se disponía de una medida de contingencia para aprovechar al máximo la carga de energía restante.

La autonomía depende directamente del umbral mínimo del SOC recomendado o exigido por el fabricante. Al considerar la adquisición de flotas de vehículo eléctricos, es necesario acordar de manera explícita con el proveedor cuál será este valor mínimo y qué implicancias respecto a las garantías tendría el incumplimiento de la restricción.

¹ Esta capacitación se refiere al entrenamiento de los operadores respecto a factores de conducción (uso del freno regenerativo, autonomía y velocidad) y al uso racional de los elementos auxiliares del bus.

² Durante la carga, la potencia en el cargador se establecía en 150 kW para ambos buses.

Grado de degradación de la batería

Las baterías van reduciendo su capacidad total de almacenar energía con el paso del tiempo y su uso.

Tras un año de operación, las baterías han reducido su capacidad en un 3,4 % en promedio. En la experiencia del equipo consultor, este valor se ve reducido aproximadamente en un 3 % por año. La literatura en la materia presenta un valor similar (Lithium Ion Battery Test Centre, 2020). El fabricante indica que este valor es del orden del 3,75 % al 5 % anual.

Extrapolación de la vida útil real de los colectivos

El proveedor de los buses utilizados en este proyecto garantiza las baterías por un periodo de ocho años, asegurando al menos una capacidad de carga del 70 % respecto a la nominal. De acuerdo con la evaluación realizada, considerando la tendencia actual, en ocho años se llegaría a un 69 %. Tras este periodo, es posible cambiar el paquete de baterías y realizar un reacondicionamiento del bus. Así, se puede dar al vehículo una vida útil de hasta 16 años.

Gestión del cargador

Uno de los grandes desafíos de evolucionar desde tecnologías vehiculares convencionales basadas en combustibles fósiles hacia tecnologías eléctricas, además de la menor autonomía, guarda relación con el cargador y el tiempo que toma el proceso de carga. Este parámetro resulta fundamental, pues este tiempo reduce la disponibilidad operacional del bus.

En la experiencia de seguimiento de este proyecto, se observó una variación en el tiempo de carga promedio de 2,15 horas a 2,70 horas para una misma cantidad de energía.² Se recomienda que en futuras iniciativas se realice un seguimiento de los tiempos y la eficiencia energética de los cargadores, para poder mantener una buena gestión del proceso de carga.

Pasajeros transportados

Se ha cuantificado el número de pasajeros transportados mediante los datos de transacciones del sistema único de boleto (SUBE) y el conteo de pasajeros a través de campañas sobre el terreno.

De ambos métodos se pudo observar que, en promedio, los buses eléctricos transportan una cantidad igual o superior de pasajeros por jornada. Se puede concluir que en ningún caso el bus eléctrico resulta incapacitado para transportar la misma cantidad de pasajeros que un bus de tecnología convencional diésel.

Consideraciones por el peso de los vehículos

El modelo de bus utilizado para este proyecto excede el límite de peso máximo establecido por la ley. Sin embargo, con los avances en las tecnologías, ya existen otros modelos en el mercado que sí cumplen las exigencias requeridas, por lo que este aspecto no se contempla como una restricción en futuras iniciativas.

Percepción de conductores y pasajeros

Tanto conductores como pasajeros se manifestaron muy conformes con las características del bus. El menor ruido, el buen funcionamiento del aire acondicionado y la transmisión continua de velocidad permiten tener un viaje más cómodo.

Evaluación económica

Se ha evaluado la factibilidad económica de la introducción de los buses eléctricos desde el punto de vista de un inversor privado, específicamente de un operador actual de buses del transporte público de la ciudad de Buenos Aires, el cual reemplaza parte de su flota actual por buses nuevos (eléctricos y convencionales). La metodología de evaluación consiste en identificar y comparar los diferenciales de inversión y de costos para el desarrollo de los dos proyectos considerando el reemplazo de ocho buses.

En el escenario base (condiciones actuales bajo las cuales se ha analizado el piloto), el proyecto de

Estilo de conducción

El seguimiento ha permitido concluir que el conductor puede tener una fuerte influencia en el consumo del bus eléctrico, con una diferencia de hasta un 10,9 % en el caso analizado. Si bien estos vehículos poseen cada vez una mayor automatización, el consumo final aún depende de la capacitación y profesionalismo del operador. Esta capacitación necesaria debe considerar lo que significa la operación completa de un bus. No solo debe incluir la conducción (mover el vehículo y los pasajeros), sino también el uso racional de los elementos auxiliares, que pueden tener una influencia importante en el consumo total de energía.

Riesgo de incendio

Si bien es posible que se produzca un incendio en un bus eléctrico debido al calentamiento anormal de los componentes, esto toma más tiempo que en un vehículo convencional, donde la ignición del combustible se puede producir de forma instantánea. A diferencia de estos últimos, un fuego en un vehículo eléctrico puede ser extinguido con agua. Según un estudio, un automóvil a gasolina tiene un riesgo de incendio aproximadamente once veces mayor que un vehículo Tesla.

buses eléctricos no es atractivo económicamente para el inversionista. El diferencial de costos acumulados en 16 años de los buses eléctricos con respecto a los buses diésel es USD 331.060 más alto por bus. Para equiparar condiciones, se debería entregar un subsidio en la compra del 43 % del valor actual del bus eléctrico.

La principal diferencia es producto de la alta inversión y el costo financiero asociado. Para el caso de los buses convencionales, la mayor proporción del gasto es producto del consumo y el mantenimiento.

Cuadro A.

Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad para la comparación de costos diferenciales entre una flota eléctrica y una a diésel (8 buses)

Fuente: Elaboración propia

Costos diferenciales (USD)	Escenario base Imp. import 35 % Tasa interés 14 %	1	2	3
		Impuesto importación 0 %	Intereses crédito (tasa 5 %)	Imp. import. 0 % Tasa interés 5 %
Buses eléctricos	6.439.728	4.956.337 (-23 %*)	5.193.945 (-19 %*)	3.988.982 (-38 %*)
Buses diésel	3.791.252	3.791.252	3.791.252	3.791.252
Diferencia (%)	41 %	24 %	27 %	5 %
Subsidio requerido por bus (USD)	227.708	98.191	151.340	21.333

Nota: *Reducción en comparación con los costos del escenario base

Se realizaron una serie de análisis bajo algunas variaciones del escenario base para entender la combinación de variables y como estas afectan la viabilidad económica de los proyectos. Los escenarios de sensibilidad usados fueron:

- Reducción de los impuestos a la importación de los buses eléctricos y sus componentes (batería y cargador).
- Reducción en la tasa de los créditos para la inversión de buses eléctricos (costo financiero).
- Reducción de los impuestos de importación y reducción de la tasa de interés de los créditos para la compra de los buses eléctricos y sus componentes asociados (batería y cargador).

El resumen de los resultados se muestra en el Cuadro A. En él, se observa que la reducción del impuesto de importación y la tasa de interés tienen un impacto significativo en las diferencias de costos entre el proyecto de buses eléctricos y el de buses diésel.

En los tres escenarios, el diferencial de costos es mayor para los buses eléctricos que para los convencionales diésel. En el escenario 3, el resultado generado se acerca a la equivalencia, es decir a una decisión casi indiferente para el inversor desde el punto de vista económico.

Se pueden realizar múltiples escenarios adicionales con el objetivo de evaluar posibles modificaciones a políticas o leyes existentes, además de negociaciones con proveedores para mejorar los precios (por economías de escala), o analizar nuevos modelos de negocios u operacionales.

Evaluación ambiental

El sector del transporte representa aproximadamente un 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad de Buenos Aires. Se estima que los dos buses eléctricos serían responsables de la emisión de 53,6 toneladas de CO₂ en los 10 meses de operación, mientras que dos buses con tecnología diésel de similares características operativas habrían emitido 140,2 toneladas, lo que representa una reducción de un

62 %. Considerando el escenario base de recambio de una flota de ocho buses, se estima que en 16 años de operación se podrían evitar unas 6.651 toneladas de CO₂.

Igualmente se ha cuantificado la reducción de material particulado y otros contaminantes locales. Se estima que la disminución obtenida aplicada a una flota de ocho buses lograría un ahorro

aproximado de USD 428.000 en gastos en salud, en un periodo de 16 años.

Al término de su primera vida útil, las baterías podrían tener entre un 50 % y un 90 % de su capacidad, lo cual podría resultar útil en

aplicaciones de almacenamiento estacionario. Se hace necesario el desarrollo de un mercado de baterías de segunda vida, cuya existencia podría mejorar la evaluación económica de los proyectos de movilidad eléctrica y lograr sinergias con otros proyectos.

Revisión de mejores prácticas

El estudio incluye el análisis de diversos proyectos en tres ciudades de América Latina. Estas experiencias permiten extraer lecciones de mejores prácticas en proyectos de buses eléctricos a tener en cuenta según la naturaleza de futuras iniciativas que se deseen implementar.

Recomendaciones

Adquisición

Dado el rápido avance en nuevas tecnologías en torno a la electromovilidad, se debe realizar una evaluación con la información y productos disponibles actualmente si se desea implementar una flota eléctrica. Se están desarrollando baterías con mayor densidad energética, que significarían menor peso para el vehículo, lo cual mejoraría los rendimientos.

Es necesario considerar el tiempo de carga, definido por la potencia del cargador y su eficiencia en el momento de la compra, pues tiene un impacto directo en los costos operacionales.

Antes de la compra, se deben proyectar los ciclos de carga que necesitarán las baterías, pues cada ciclo reduce la autonomía del vehículo y podría incluso afectar la garantía de estas.

Aspectos técnicos

Resulta clave monitorear la autonomía de los vehículos, dada su relevancia en la continuidad de la operación. La autonomía se verá afectada por el estilo de conducción y el nivel de degradación de la batería.

Además, se debe analizar en una etapa temprana la factibilidad del proyecto en cuanto a la potencia de la que dispone la distribuidora de electricidad en la localización donde se desea instalar los cargadores.

Aspectos de gestión de la operación

Se recomienda mantener un monitoreo permanente de las variables que influyen en el consumo, así como un programa de capacitación continuo a los conductores, que se alimente de los indicadores de este monitoreo. También se debe mantener un registro de las operaciones realizadas en el cargador.

Aspectos económicos

Actualmente, un proyecto de reemplazo de bus diésel por eléctrico no resulta factible desde el punto de vista económico, por lo que se deben crear condiciones favorables para el inversor. Se analizaron escenarios de reducción de costos de adquisición o de impuestos, así como de mejores condiciones crediticias.

Se calcula que los costos variables del bus eléctrico son un 86 % más bajos que los del bus convencional con motor diésel de similares prestaciones. Por ello, una vez adquirido, se debe maximizar su utilización en la operación.

Conclusiones

En este proyecto piloto, los buses cumplieron de manera satisfactoria la operación, tanto en lo que refiere a pasajeros transportados como a kilómetros recorridos. La sostenibilidad de este resultado está sujeta a la posibilidad de recarga durante el día, pues se espera una autonomía decreciente por la degradación de la batería.

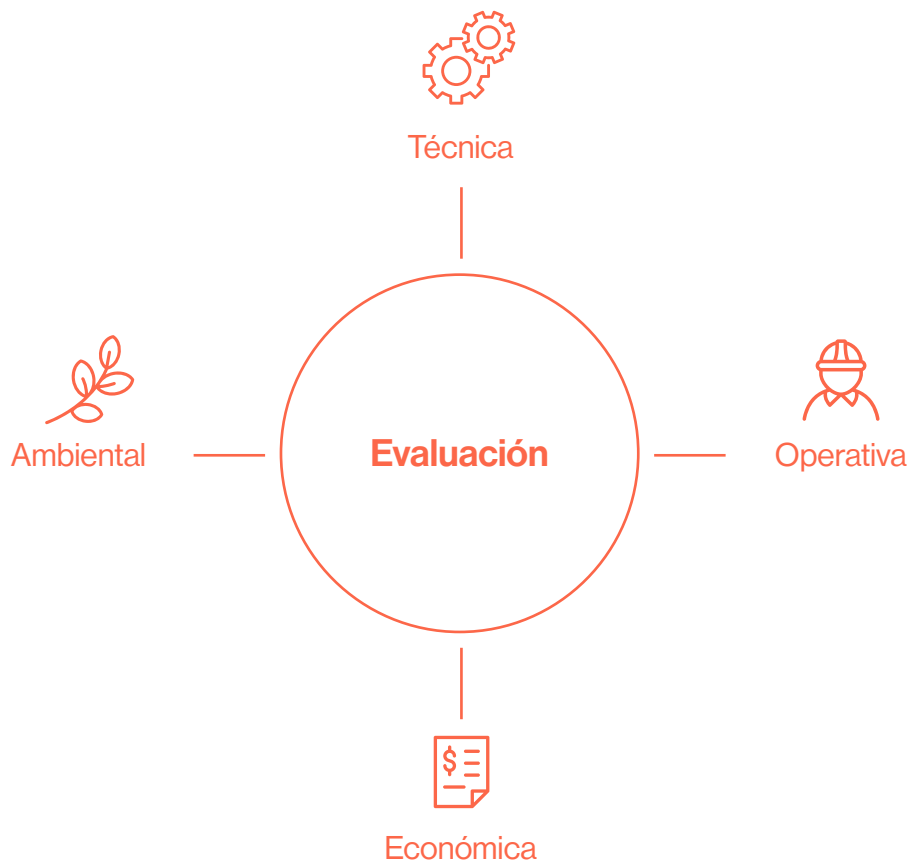
Se ha observado, igualmente, una buena recepción de esta tecnología por parte de los pasajeros y los conductores.

Las principales variables que afectan el consumo de energía, para las condiciones de operación en Buenos Aires son: el estilo de operación del conductor, la temperatura ambiente, la cantidad de pasajeros transportados y la velocidad media del viaje.

Actualmente, es necesario considerar incentivos económicos para obtener un proyecto rentable de recambio de buses diésel por eléctricos. Si bien los costos variables son ampliamente menores, la inversión inicial resulta una barrera importante.

2/ Objetivos

El objetivo principal de este estudio fue analizar la factibilidad técnica, operativa, económica y ambiental de los buses eléctricos en Buenos Aires, a partir del monitoreo de la operación en condiciones reales de dos unidades que circularon durante 12 meses en el sistema de transporte público de esta ciudad.³



³ Debido a las cuarentenas impuestas por el Gobierno en el marco de la pandemia de la COVID-19, el análisis realizado en este reporte sólo considera los primeros 10 meses de operación. El resto de los meses, los buses continuaron su operación satisfactoriamente, pero en condiciones de tráfico y demanda poco representativas para los objetivos de este estudio.

3/ Antecedentes

El sistema de transporte de Buenos Aires es el que tiene mayor cantidad de buses dentro de las ciudades de la República Argentina, al ser esta la que concentra la mayor cantidad de habitantes del país. En este sistema actualmente predomina la tecnología diésel.

Los buses en Buenos Aires circulan durante las 24 horas del día, con frecuencias que oscilan entre los 2 y los 40 minutos, dependiendo de la línea y de la hora del día. Existen 137 líneas y sus recorridos conectan no sólo diferentes puntos de la ciudad, sino también a la ciudad con distintos municipios del Área Metropolitana de Buenos Aires.

Para la realización de este estudio, se monitoreó la operación de dos autobuses eléctricos en la línea 59 de la ciudad de Buenos Aires entre el 17 de mayo de 2019 y el 16 de mayo de 2020. Los vehículos,

identificados como Bus 1 y Bus 2 en este reporte,⁴ eran de marca Yutong, modelo ZK6128BEVG, y fueron importados por la empresa Colgas. Estos autobuses disponían de una capacidad nominal de almacenamiento de energía en las baterías de potencia de 324 kWh, eran de carga lenta y poseían una autonomía estimada por el fabricante de 250 km. También se instaló un cargador con una potencia nominal de 150 kW. La potencia contratada a la empresa distribuidora fue de 170 kW.

En una primera etapa del monitoreo, los buses fueron asignados a una ruta de 40 km de extensión. Desde el 5 de agosto de 2019, los buses realizaron una ruta extendida, que complementaba el recorrido original y totalizaba 58 km. Estos recorridos, cuyo trazado se presenta en la Figura 1, son denominados en este informe “circuito corto” y “circuito largo”, respectivamente.

Figura 1.
Trazado para el circuito corto (naranja)
y el complemento que define el circuito largo (azul)

Fuente: Monitoreo con datos de posicionamiento (GPS) realizado por el equipo consultor durante la campaña de conteo de pasajeros.



⁴ El monitoreo continuó hasta el 16 de mayo, pero dado que el final de este periodo estuvo marcado por una cuarentena en la ciudad de Buenos Aires, los análisis presentados solo consideran diez meses.

4/ Evaluación técnica

En esta sección se consideran los aspectos técnicos que caracterizaron la operación de los buses eléctricos, y que permitieron evaluar su factibilidad. Estos aspectos fueron también insumos importantes para la evaluación de factibilidad económica que se presenta más adelante.

Resultados de la evaluación técnica

Consumo de energía

El consumo mínimo y máximo de energía de los buses 1 y 2 bajo seguimiento fue de 0,91 kWh/km y 1,12 kWh/km respectivamente, como se observa en el Gráfico 1. El promedio observado fue de 1,01 kWh/km.

El consumo final de energía depende de la eficiencia del cargador y las baterías, elementos que, de acuerdo con la literatura en la materia, tienen en conjunto una eficiencia del orden del 82 % al 92 % (Lithium Ion Battery Test Centre, 2020, y Gao *et al.*, 2017). En esta experiencia se obtuvo un resultado similar. El valor final de energía consumida permite cuantificar el costo económico y el impacto ambiental de la operación de un bus eléctrico, analizados en las secciones respectivas de este estudio.

En la mayoría de los casos, el consumo del Bus 2 fue superior al consumo del Bus 1. Esto se

atribuye a la diferencia en el estilo de conducción de los distintos conductores (ver sección “Recomendaciones a nivel técnico”).

El consumo presentado corresponde a la energía que es entregada desde el banco de baterías del bus. Este fue obtenido con base a los registros del estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés)⁵ y odómetros realizados por los mismos conductores al inicio y fin de cada viaje.

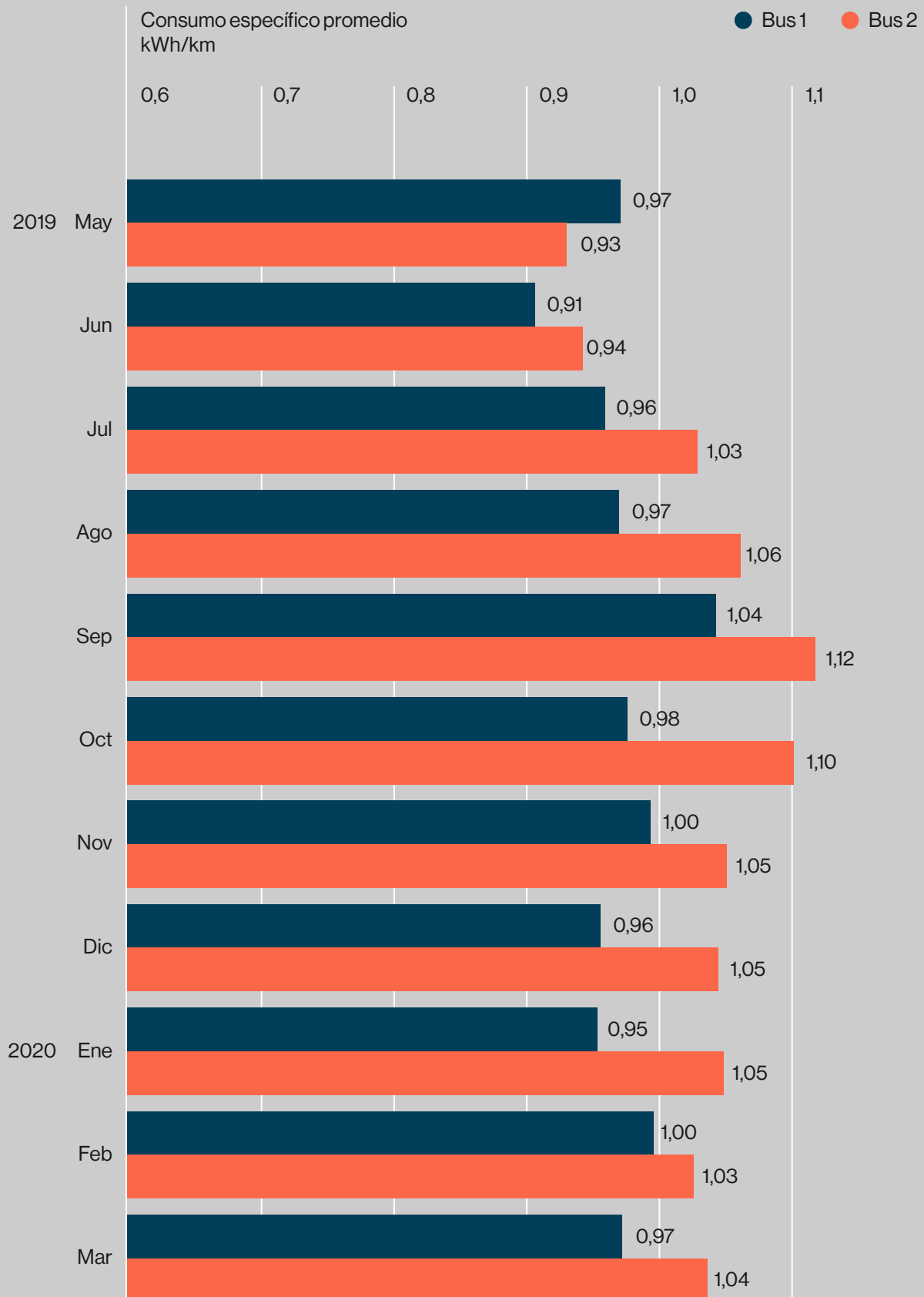
Principales factores que afectan el consumo de energía

A continuación se analizan aquellos factores que influyeron en el consumo de energía por kilómetro observado en la operación de los buses bajo seguimiento. Uno de los factores con mayor incidencia en el consumo fue el estilo de

⁵ Se considera que un 100 % del SOC corresponde a 324 kWh.

Gráfico 1.
**Consumo específico promedio de energía
para cada bus bajo seguimiento**

Fuente: Elaboración propia con base en datos registrados por la línea 59.







conducción⁶ (ver la sección “Recomendaciones a nivel técnico”). El resumen de los efectos identificados debido a estos factores se muestra en el Cuadro 1.

Para entender el impacto relativo que tiene cada una de las variables y vistas de forma simultánea, se generó un modelo teórico que considera el consumo de energía como una función de la velocidad, la cantidad de pasajeros y la temperatura (esta última influye en el uso de los sistemas auxiliares).

Cuadro 1. Principales factores que afectan el consumo de energía

Fuente: Elaboración propia.

Factor	Efecto sobre el consumo de energía
 Uso del aire acondicionado	<ul style="list-style-type: none"> - Entre los meses de octubre y febrero, el consumo promedio por uso del aire acondicionado (A/C) ascendió al 7,4 % de la energía cargada, correspondiendo a 422,7 kWh/mes. Esta energía equivale a la necesaria para recorrer unos 400 km.* - El máximo consumo de energía por el A/C se registró en febrero, y correspondió a un 9,3 % de la energía cargada. En términos absolutos, esta energía asciende a 512,7 kWh/mes, un valor doce veces más alto que el mínimo obtenido en julio, reflejando la estacionalidad de este gasto energético.
Uso de sistemas auxiliares y de temperatura  Uso del dispositivo antihielo	<ul style="list-style-type: none"> - Entre los meses de junio y octubre, el consumo promedio mensual del dispositivo antihielo ascendió a un 5 % de la energía cargada, correspondiente a 284,1 kWh/mes. Esta energía equivale a la necesaria para recorrer unos 281 km.** - La fracción de energía consumida fue prácticamente cero desde noviembre en adelante. - El máximo consumo de energía por el dispositivo antihielo se registró en julio en el Bus 2, y fue de un 12,1 % de la energía cargada. Este consumo representa casi el doble de lo observado para el Bus 1 en el mismo mes, reflejando una operación descuidada por parte de uno de los conductores. - En un vehículo convencional, la energía para este dispositivo proviene del calor residual del motor de combustión interna, teniendo un costo energético adicional prácticamente nulo al utilizarlo. El bus eléctrico debe generar este calor de forma dedicada, pudiendo llegar a ser una parte importante de este costo. - Las diferencias entre los consumos de un bus y otro reflejan la importancia de monitorear y capacitar a los conductores en el uso apropiado de estos elementos, o evaluar en futuras adquisiciones una solución tecnológica que gestione su uso.
Cantidad de pasajeros transportados 	<ul style="list-style-type: none"> - La mayor cantidad de pasajeros implica que el vehículo debe mover un mayor peso, incrementando la demanda energética. - Con el aumento de pasajeros también se incrementa la carga térmica, haciendo necesario el uso de aire acondicionado.
Velocidad media 	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa una tendencia a la reducción en el consumo de energía a medida que aumenta la velocidad media. - Esto se puede atribuir a que una mayor velocidad media para un mismo recorrido representa menos cantidad de episodios de frenado, en los cuales se pierde energía.

Notas: * Considerando el consumo específico promedio para esos meses en el bus bajo análisis: 1,06 kWh/km. ** Considerando el consumo específico promedio para esos meses: 1,01 kWh/km.

6 El estilo de conducción debería estar gobernado bajo los principios de conducción eficiente. Este concepto se refiere al conjunto de técnicas con las cuales el conductor reduce el consumo de energía, sin perjuicio en la calidad del servicio prestado. Las técnicas consideradas incluyen, entre otras, conservar la inercia del vehículo, usar racionalmente los elementos auxiliares y acelerar de forma moderada. Se han realizado diversas iniciativas a nivel gubernamental para fomentar esta metodología en vehículos convencionales diésel en varios países, como Estados Unidos, España y Chile.

Este modelo permite proyectar cómo variaría el consumo energético bajo distintas condiciones, pensando en la introducción de estas tecnologías en otras ciudades. En el caso de la velocidad, esta se puede optimizar con mejor infraestructura vial, como corredores dedicados sólo para el transporte público, permitiendo obtener menores consumos, tiempos de viaje y emisiones. En el Gráfico 2, se presentan un escenario base y 4 escenarios adicionales construidos considerando diferentes condiciones de operación.

Se puede observar que la reducción de velocidad en 2 km/hr (aumento de la congestión) tiene un impacto en el consumo (sube el 10 %), similar a lo que ocurre si la temperatura del viaje es 5°C mayor. Al incrementar la cantidad de pasajeros en 100 personas, manteniendo una misma velocidad y temperatura, el consumo aumenta en un 13 %. Finalmente, el modelo⁷ desarrollado permite calcular la influencia simultánea de todas las variables como la suma directa, incrementando en un 33 % el consumo para el escenario D.

Si bien el modelo obtenido no es válido para todas las posibles condiciones de operación observadas, sí permite analizar la influencia relativa de cada una de las variables respecto a una situación base para el periodo considerado.⁸

Freno regenerativo

Los registros electrónicos del bus permitieron conocer la cantidad de energía generada por el freno regenerativo. En el Gráfico 3 se presenta el aporte de este dispositivo para cada uno de los buses.⁹

Los registros indican que el freno regenerativo recupera, en promedio, un 43 % del total de la energía necesaria para el desplazamiento del bus. El Bus 2 tiene una tasa de recuperación mayor que la del Bus 1. Sin embargo, esto no significa necesariamente que el bus está ahorrando más energía. Un conductor que acelera y frena repetidas veces, en lugar de mantener una velocidad constante, aunque menor, aumentará su tasa de recuperación, pero incrementará aún más su

consumo global de energía. Esto es justamente lo que ocurre en el caso del Bus 2, donde si bien se observa un 3 % más de recuperación, la energía cargada es un 10 % mayor.

Estos resultados hacen evidente que el aporte del freno regenerativo dependerá de la forma de operar del conductor. Además de la frecuencia de las aceleraciones y frenadas, la intensidad de estas últimas también puede afectar la tasa de recuperación. La situación ideal para maximizar la recuperación es cuando el conductor puede programar un frenado de intensidad media, evitando reducciones bruscas de velocidad. Las frenadas bruscas obligan a que la energía sea absorbida por los frenos convencionales, liberando la energía al ambiente en forma de calor y ruido.

Autonomía

La autonomía se refiere a la distancia que un vehículo puede recorrer sin necesidad de recargar energía. Esta variable es fundamental para la implementación de movilidad eléctrica en los sistemas de transporte actuales, ya que puede ser una limitante en el tipo de operación de los vehículos.

Según los resultados (mostrados en el Gráfico 4), las menores autonomías observadas para los Buses 1 y 2 corresponden a 223 km y 195 km, respectivamente. Estos valores permitirían operar 3 vueltas y una fracción de la cuarta en el circuito largo.¹⁰ Esta diferencia de 28 km en la autonomía disponible diariamente pone de manifiesto el impacto que tiene la forma de conducir de cada conductor.

Aun cuando un conductor ha recibido una capacitación inicial, esto no asegura la aplicación de buenas prácticas durante la operación en los meses siguientes. Por ello, se sugiere mantener un programa de capacitación regular, que se nutra, en cuanto a contenidos y público objetivo, de los resultados del monitoreo que se lleve a cabo.

⁷ Se establecieron como condiciones fijas los horarios y el conductor. Dada la gran influencia de este último, se prepararon dos modelos, uno para cada vehículo. Sólo el Bus 1 arrojó un resultado con pruebas estadísticas que aseguran la representatividad, con un valor de R2 ajustado de 0,69. El valor de R2 de 0,69 representa una correlación de efecto moderado (Moore, 2013).

⁸ El periodo abarcado va del 22 de octubre de 2019 al 14 de febrero de 2020.

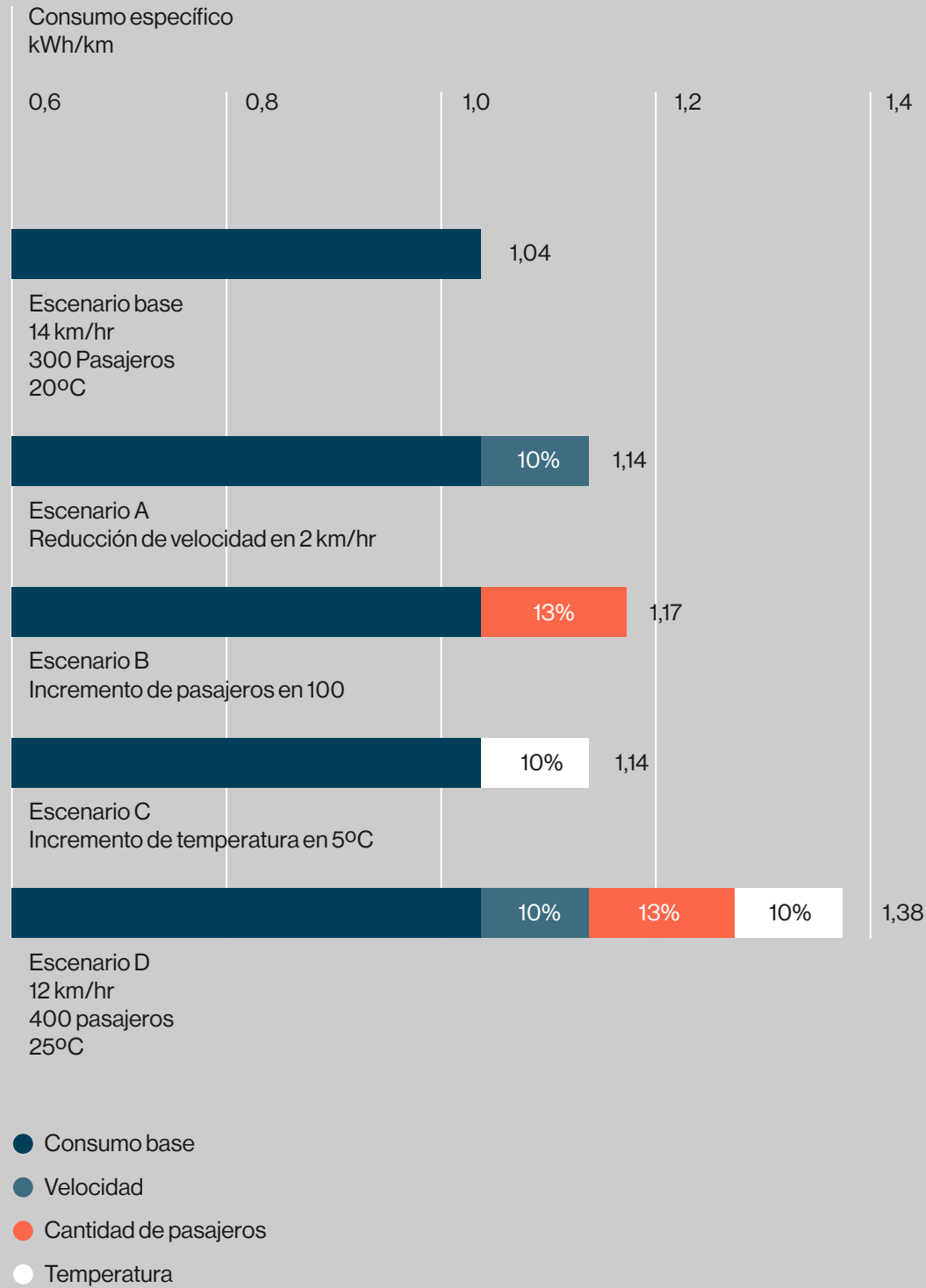
⁹ El periodo de registro considerado va desde el 17 de mayo al 3 de diciembre de 2019.

¹⁰ El circuito largo tenía una extensión de 58 km.

Gráfico 2.

Consumo energético proyectado por el modelo para distintos escenarios de las variables independientes consideradas: velocidad, cantidad de pasajeros y temperatura

Fuente: Elaboración propia con base en datos registrados por la línea, conteo de pasajeros en terreno y media de temperaturas ambiente de cada viaje.



La autonomía puede variar significativamente a lo largo del año, siendo el valor máximo observado un 33 % más alto que el mínimo observado (mayo y octubre en el Bus 2). Esta diferencia sugiere la necesidad de mantener un monitoreo permanente con el fin de reducir los riesgos de no disponer de la energía suficiente para completar un viaje y retornar al punto de carga de energía.

Respecto a la autonomía esperada de 250 km, si se toma como base para el cálculo los consumos promedio de energía para cada mes, se tiene que, en el Bus 1, esta autonomía se logró casi todos los meses. En cambio, para el Bus 2, solo se observó la autonomía indicada en la mitad de los meses considerados. Ahora bien, se debe notar que para efectuar la operación normal no basta con conocer la autonomía promedio, sino que se deben establecer criterios para asegurar la operación todos los días, instaurando medidas de contingencia para aquellos días en que se prevea que no alcanzará el valor esperado.

Durante casi 9 meses, las baterías de los buses fueron recargadas dos veces al día, lo cual aseguró su autonomía para operar toda una jornada. Durante un mes, el bus fue recargado una sola vez al 100 % del SOC antes de la jornada. En este periodo hubo algunos días que no pudo cubrir la totalidad de los kilómetros (un 5 % de los días para el Bus 1 y un 25 % para el Bus 2). En todos estos casos, se tenía una medida de contingencia para realizar un servicio de menos kilómetros, que permitía continuar con la operación, aprovechando al máximo la carga de energía restante.

La autonomía del autobús depende directamente del umbral mínimo del SOC recomendado o exigido por el fabricante. En una primera instancia, se recomendó mantener un nivel mínimo del 30 % en el SOC, lo cual perjudicaba la autonomía disponible. Al considerar la adquisición de flotas de vehículo eléctricos, es necesario acordar de manera explícita con el proveedor cuál será este valor mínimo, y qué implicancias respecto a sus garantías tendría el incumplimiento de la restricción.

Finalmente, se debe considerar la degradación de la batería, lo cual reduce su autonomía (ver sección siguiente). Esta reducción puede ocasionar que se requiera una carga adicional, al menos parcial, que permita maximizar la cantidad de kilómetros de operación.

Gráfico 3. Energía recuperada respecto a la energía total utilizada por cada bus

Fuente: Información del registro electrónico del fabricante.

● Energía cargada
● Energía recuperada

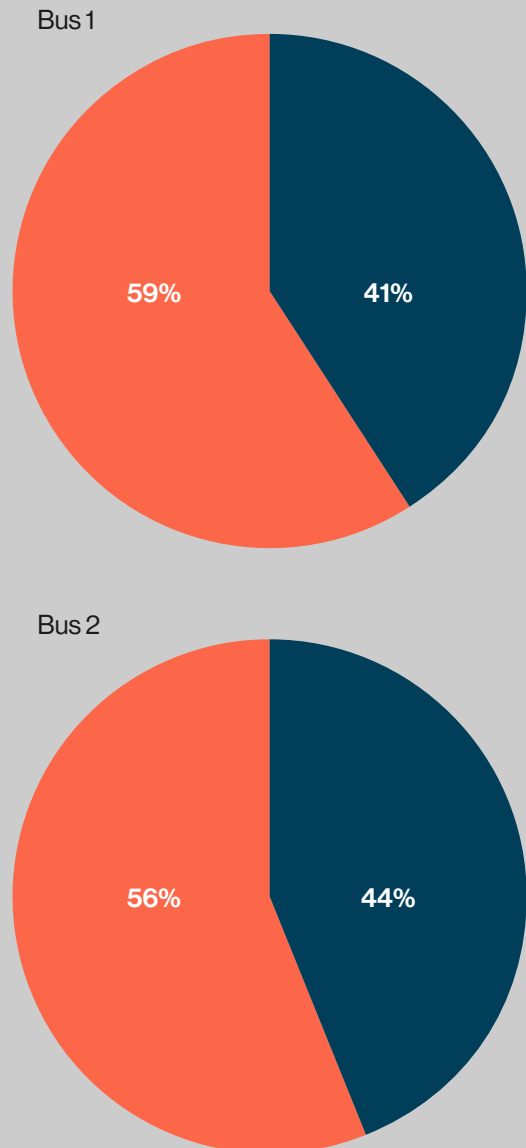
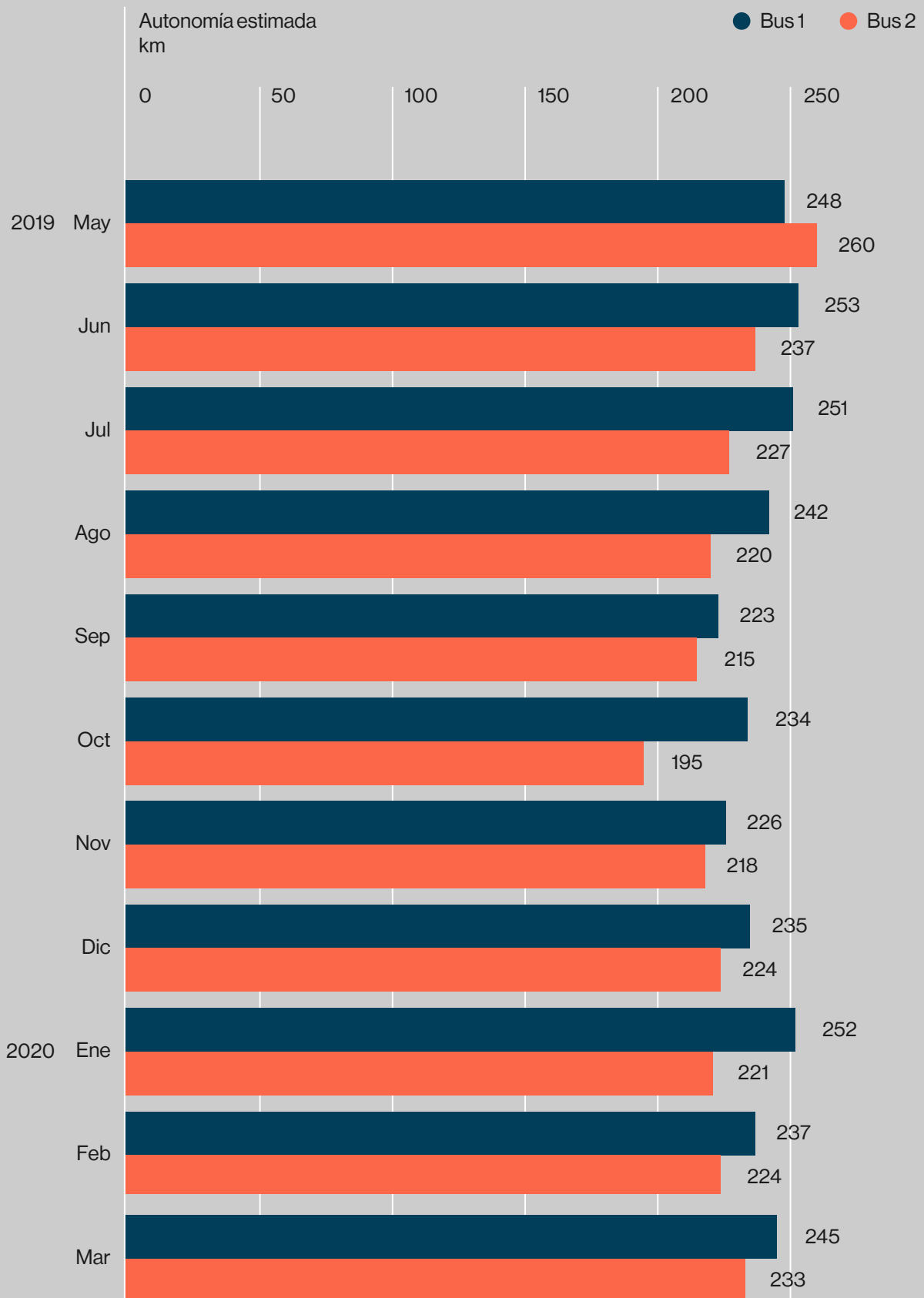


Gráfico 4. Autonomía estimada para cada bus

Fuente: Elaboración propia con base en datos registrados por la línea.



Grado de degradación de la batería

La cantidad de ciclos de carga y descarga a los que se someten las baterías tiene una influencia directa en su capacidad de almacenamiento de energía, la cual se va reduciendo con el uso. La experiencia del autor con otros estudios apunta a que esta disminuye de forma lineal aproximadamente en un 3 % por año respecto a la capacidad de energía inicialmente disponible. La literatura en esta materia presenta un valor similar (Lithium Ion Battery Test Centre, 2020), mientras que el fabricante indica que este valor es del orden del 3,75 % anual.

Según el análisis realizado, la reducción promedio en la capacidad de almacenamiento para esta experiencia fue del 3,4 % en el primer año de operación.¹¹ Durante el primer año, se realizaron un total de 470 ciclos de carga y descarga en cada bus. Considerando el valor promedio de degradación y los ciclos esperados, se proyecta que la capacidad

de la batería sea del 69 % al final de un periodo de 8 años. Este resultado es consecuente con la experiencia internacional recabada (Bloomberg Finance L.P., 2018).

Extrapolación de la vida útil real de los buses

El proveedor de los buses utilizados en este proyecto garantiza las baterías por un periodo de 8 años, asegurando al menos una capacidad de carga del 70 % respecto a la nominal. En la sección anterior se proyectó un valor del 69 % con las tendencias actuales.

Tras este periodo de ocho años, es posible recambiar el paquete de baterías por uno nuevo y realizar un reacondicionamiento del bus, con un costo que se analiza en la evaluación económica de este informe (p. 33). Así, se puede dar al bus una vida útil de hasta 16 años.

Recomendaciones a nivel técnico

El cargador es un elemento fundamental para programar la operación de una flota de vehículos eléctricos, por lo que las alternativas de carga se deben analizar en el momento de la compra. Los tiempos de carga se determinan por el tipo de cargador: carga lenta, carga rápida o cargador de oportunidad. Se debe prestar atención a la eficiencia garantizada por el fabricante, pues esta acompañará la operación durante toda la vida útil de la flota. Es recomendable tener cargadores adicionales de respaldo para mantener la disponibilidad de la flota en caso de que alguno de estos falle.

En general, el mantenimiento necesario en un equipo de carga lenta, como el utilizado en este proyecto, es simple y requiere de una inspección cada tres meses para saber si es necesario ajustar o reemplazar componentes de manera preventiva.

Los cargadores utilizados cuentan con más de un terminal de conexión, por lo que se pueden conectar uno o dos buses a la vez. En caso de

que se carguen dos buses, esto se hará utilizando el 50 % de la potencia disponible para cada uno. En este proyecto piloto, el fabricante recomendó cargar un bus a la vez, a la máxima potencia nominal disponible (150 kW), con el fin de reducir los tiempos de detención del vehículo.

Otra importante característica que se debe considerar en el momento de la compra es la capacidad de programar la hora de inicio de las cargas. Dado que las tarifas eléctricas no son las mismas en todo horario, esta alternativa posiblemente permitiría manejar la operación de una manera más costo-efectiva.

Uno de los grandes desafíos de evolucionar desde tecnologías vehiculares convencionales basadas en combustibles fósiles hacia tecnologías eléctricas, además de la menor autonomía ya presentada, es el tiempo que toma realizar la carga de energía. Esta variable resulta fundamental, pues este tiempo reduce la disponibilidad operacional del bus.

¹¹ Para evaluar el grado de degradación de las baterías, se analizó cuánta energía estas son capaces de recibir en cada carga. Esta metodología permite obtener una estimación aproximada del nivel de degradación, pues la manera más precisa de realizar esta medición es descargando las baterías hasta un nivel determinado bajo condiciones controladas de corriente y voltaje, lo cual no fue factible en este proyecto.

Por ello, es necesario monitorear las actividades de carga ejecutadas para identificar y corregir eventuales problemas. Se recomienda llevar un registro de, al menos, las siguientes variables:

- Fecha y hora de carga
- Odómetro
- Cantidad de energía cargada, medida en kWh
- SOC inicial y SOC final
- Tiempo de duración de la carga (u hora de término alternativamente)
- Persona que realizó la carga

En la experiencia de seguimiento de este proyecto, se observó a lo largo de los meses una variabilidad con tendencia incremental en el tiempo de carga. Considerando una carga estándar, definida como la necesaria para elevar el SOC de las baterías del 20 % al 100 %, el tiempo requerido varió de 2,15 horas a 2,70 horas.

Se recomienda que, cuando se disponga de una flota eléctrica, se ejecute una gestión apropiada con los cargadores que se adquieran, lo que significa llevar los registros sugeridos y realizar un análisis cada uno o dos meses. Esto permitirá tener mayores herramientas para la gestión de los tiempos, para el uso de los recursos humanos, para optimizar la eficiencia energética de la operación y para futuras renovaciones de flota.



5/ Evaluación operativa



En esta sección se presentan aquellos parámetros que permiten comprender las condiciones necesarias para que un bus eléctrico realice la operación de transporte en la ciudad de Buenos Aires, así como recomendaciones para que esta operación sea eficiente.

Resultados de la evaluación operativa

En el Cuadro 2 se muestra el resumen de las variables operativas monitoreadas.

Cuadro 2.
Variables operativas relevantes del monitoreo

Fuente: Elaboración propia

Variable	Resultados del monitoreo
 Pasajeros transportados	<ul style="list-style-type: none">- Los buses eléctricos transportaron en promedio una cantidad igual o superior de pasajeros por jornada que los autobuses movidos por diésel, según el sistema de transacciones del sistema único de boleto electrónico (SUBE).*- En la jornada antes del mediodía, los buses eléctricos transportaron un 30 % más de pasajeros que los de diésel, y en la jornada después del mediodía un 9 % más.- Según el conteo que se realizó sobre el terreno para 50 recorridos completos, los buses eléctricos transportaron un 14 % más de pasajeros que los buses a diésel.- En ningún caso el bus eléctrico se encontró en desventaja en cuanto a su capacidad para transportar la misma cantidad de pasajeros que un bus de tecnología convencional diésel que estuviera operando en la ciudad de Buenos Aires.
 Estilo de conducción	<ul style="list-style-type: none">- Bajo condiciones similares de tráfico y jornada, se identificaron diferencias en el consumo energético del bus dependiendo del conductor asignado.- El estilo de conducción influyó en el consumo del bus eléctrico, con una diferencia, según los conductores, de hasta un 10,9 %, en la operación analizada.- Si bien los vehículos poseen cada vez mayor automatización, el consumo final aún depende de la capacitación y profesionalismo del conductor. La capacitación debe considerar no solo la conducción (mover el vehículo y los pasajeros), sino también el uso racional de los elementos auxiliares, que pueden tener una influencia importante en el consumo total de energía.

Nota: * SUBE consiste en un servicio de prepago que permite cargar dinero a una tarjeta inteligente, de la que se va descontando el valor de los viajes realizados en el sistema de transporte público del Área Metropolitana de Buenos Aires y otros lugares. El Gobierno mantiene un registro de las transacciones realizadas por los usuarios en el sistema, el cual se utilizó para este análisis.

Recomendaciones a nivel operativo

Medidas de contingencia en días de mayor consumo

Para asegurar una operación continua de los buses eléctricos sin riesgo de quedar sin energía en medio de la ruta, se debe seleccionar un modelo con la capacidad de batería necesaria para satisfacer las necesidades particulares de cada operación, considerando la extensión, la geografía y las temperaturas. Sin embargo, la operación programada de los buses se debe adaptar según la variación en el consumo de energía a lo largo del año y la reducción de la autonomía por la degradación de la capacidad de las baterías.

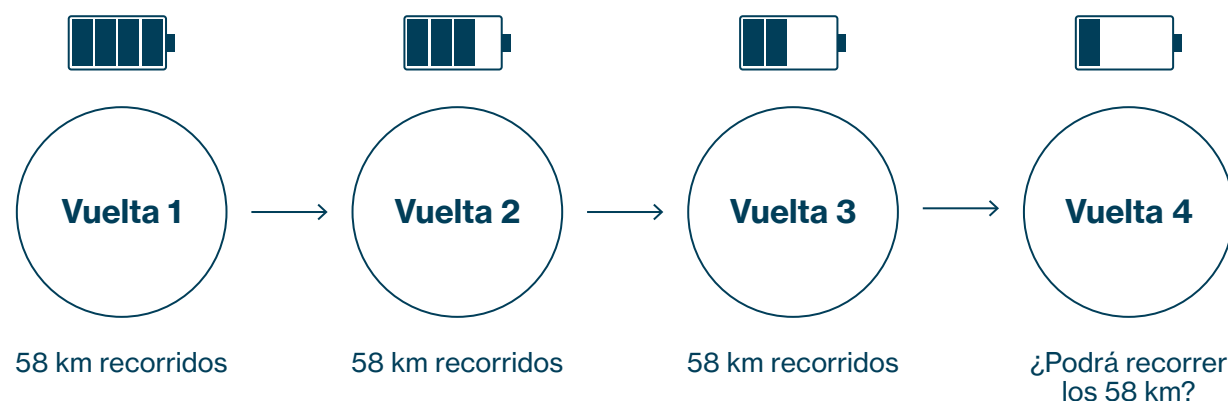
Para el caso particular de la línea de autobuses participante en este proyecto, el vehículo debía

realizar dos recorridos, cada uno de 58 km, en la mañana y otros dos por la tarde, completando diariamente 4 vueltas en un mismo circuito. Si el consumo de energía era muy alto durante las primeras 3 vueltas, es posible que la energía restante no permitiera efectuar la vuelta 4 (ver Figura 2). No es admisible que el bus quede sin carga en medio de su recorrido.

Existen cuatro medidas posibles que eliminan el riesgo de quedar sin energía en medio de la ruta. En el Cuadro 3 se presentan las medidas, con la correspondiente descripción, ordenadas de la más recomendada a la menos recomendada. La aplicación de al menos una de ellas, evita no poder completar el viaje por falta de energía.

Figura 2.
Esquema de descarga de la batería en cada vuelta, considerando la operación específica de la línea participante en el proyecto





Fuente: Elaboración propia.



Cuadro 3.

Medidas de contingencia propuestas para días de mayor consumo

Fuente: Elaboración propia.

Medidas	Descripción
 Modificar la operación dinámicamente	<p>Se podría destinar el vehículo a realizar un recorrido más corto, que le permita seguir operando sin necesidad de recarga, pero asegurando su retorno para una provisión posterior de energía.</p> <p>Esta alternativa resulta la más conveniente, pues permite maximizar la utilización del material rodante ajustándose a las condiciones técnicas reales disponibles.</p> <p>En el caso de la línea participante en el proyecto, el circuito contaba con un punto de retorno intermedio, que reducía la extensión total de 58 km a 40 km, denominado “circuito corto”.</p>
 Realizar una carga parcial diurna	<p>Si se tiene tiempo y un cargador, se puede realizar una carga parcial que permita disponer de la energía suficiente para finalizar la jornada.</p>
 Utilizar un rango de carga de emergencia	<p>Considerar rebasar el umbral mínimo del SOC recomendado por el fabricante del 20 %, hasta llegar a un 10 %. Esto otorgaría alrededor de 32 km adicionales de autonomía al vehículo, pero arriesgando una reducción en la vida útil de la batería. Este valor de autonomía adicional se reducirá a medida que aumente el nivel de degradación de la batería (ver sección “Grado de degradación de la batería”).</p> <p>En el momento de evaluar la compra de un vehículo eléctrico, se debe conocer no sólo la capacidad total de energía almacenable en la batería, sino también la oferta que hace cada fabricante respecto a la <i>capacidad útil*</i> que realmente se tendrá. En el catálogo de características técnicas se suele presentar la capacidad total, pero no el SOC mínimo recomendado.</p>
 Reducir la disponibilidad del vehículo	<p>El operador podría optar por no realizar un próximo viaje y dejar el bus detenido hasta su próxima carga de energía. Si bien esta medida elimina totalmente el riesgo de una inmovilización del vehículo en medio de la ruta, no es deseable que el bus vea reducida su disponibilidad para prestar servicio a la comunidad, disminuyendo además los ingresos operacionales de la empresa.</p>

Nota: * La capacidad útil se refiere a la capacidad que tiene la batería desde su carga máxima hasta el umbral mínimo del SOC recomendado por el fabricante.

Percepción del conductor

Un factor positivo y destacado de los buses es la mayor comodidad que ofrece al conductor. Quienes participaron en este monitoreo expresaron que el bus es muy cómodo, y que la reducción de ruido respecto a la operación de un bus con motor diésel, junto con la transmisión continua de velocidad, hace más agradable la conducción. Además, las maniobras eran más fáciles gracias a la existencia de una cámara que se activa en reversa, lo que resultaba muy útil en el momento de ubicar el bus en su punto de carga. Por lo anterior, otros conductores de la línea han manifestado una buena disposición a conducir el bus eléctrico, según los comentarios realizados por el gerente.

Percepción del pasajero

De acuerdo a lo percibido por el personal sobre el terreno, los pasajeros recibieron bien los buses eléctricos. Dado que durante el proyecto estos vehículos mantenían horarios fijos de circulación, algunos pasajeros incluso esperaban el bus eléctrico, aun cuando eso implicara alargar el tiempo completo de viaje.

Las mejoras observadas por los pasajeros se refieren a la sensación de un aire acondicionado de mejores prestaciones y la transmisión de velocidad continua, reduciendo las aceleraciones bruscas que se pueden experimentar en cada cambio de marcha del bus diésel. También destacan el hecho de que el bus sea de piso más bajo, facilitando el acceso y salida

de personas con movilidad reducida. La conexión USB para cargar dispositivos móviles fue igualmente considerada muy útil por parte de los pasajeros.

Consideraciones debido al riesgo de incendio

Según la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) de Estados Unidos, los vehículos eléctricos a batería (VEB) tienen un riesgo de incendio igual o ligeramente menor que los vehículos de motor de combustión interna (VMCI). Pruebas realizadas por la Asociación Automotriz de Alemania (ADAC) indican este mismo resultado.

La mayor diferencia entre ambos vehículos respecto a un eventual incendio es que los VMCI entran en combustión casi inmediatamente después de que una chispa o llama entre en contacto con el combustible, mientras que un VEB toma más tiempo para alcanzar la temperatura que causa el fuego. Además, un incendio en un VEB se puede extinguir con agua, pero no los que ocurren con los VMCI. En el caso de un accidente, la corriente eléctrica de la batería es inmediatamente interrumpida por el sistema de operación del vehículo (Volkswagen, 2020).

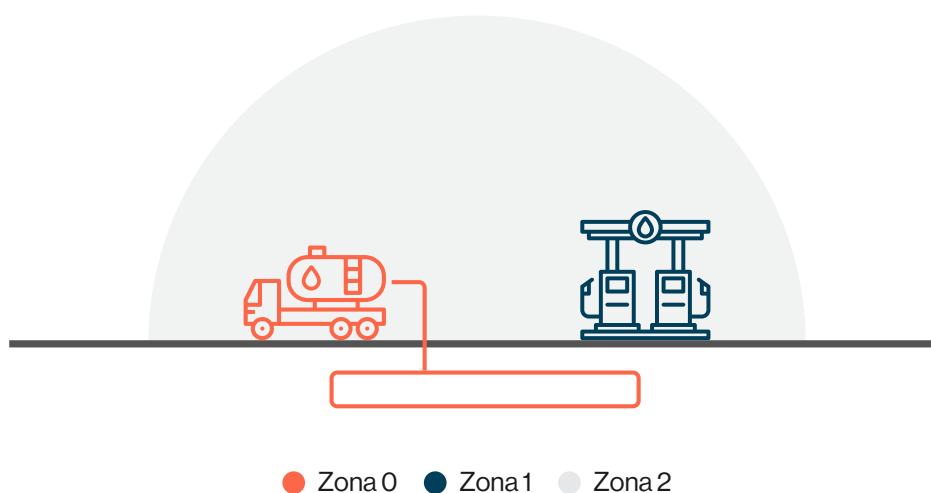
Tesla estima que un automóvil a gasolina tiene un riesgo de incendio aproximadamente once veces mayor que un vehículo Tesla, según las estadísticas por distancia recorrida (CNN Business, 2018).

Debido a las situaciones de riesgo de incendio, los sistemas de carga deben operarse según normas específicas de seguridad. Si los cargadores están ubicados en zonas con riesgo de explosión (por ejemplo, en estaciones de servicio en las que se surte combustible) la instalación debe cumplir con la norma Argentina AEA 90079-14, lo que indica que los equipos deben ser montados fuera de la zona 0, la zona 1 y la zona 2, según lo definido en esta norma, y además deben mantener el grado de protección IP¹² idóneo para el caso de instalación (ver Figura 3).

Se debe notar que los bomberos requieren una capacitación especial para extinguir incendios de este tipo de vehículos. En general, es necesario una gran cantidad de agua para enfriar una batería que fue expuesta a una fuente intensa de calor, o que se haya sobrecalentado o incendiado. La extinción de un incendio de este tipo puede tomar hasta 24 horas (Tesla, 2016).

Figura 3.
Zonas con riesgo de explosión, según la norma argentina AEA

Fuente: Elaboración propia con base en AEA (2012)



¹² El grado de protección IP está definido por una norma internacional establecida por la Comisión Electrónica Internacional que se utiliza en los datos técnicos de equipamiento eléctrico o electrónico.

Según la norma de la Asociación Electrónica Argentina (AEA 90079-14), las zonas se describen de la siguiente manera:

- Zona 0: lugar donde una atmósfera explosiva está presente en forma continua o por largos periodos de tiempo.
- Zona 1: lugar donde es probable que ocurra una atmósfera explosiva ocasionalmente en operación normal.
- Zona 2: lugar donde no es probable que se forme una atmósfera explosiva durante la operación normal, pero, si esto ocurre, permanecerá solamente por un corto periodo de tiempo.

Consideraciones por el peso de los vehículos

Actualmente, los buses eléctricos utilizados en este proyecto no cumplen con la normativa respecto al peso máximo del vehículo. El Decreto 32/2018 del Ministerio de Transporte establece el peso bruto máximo que puede tener un vehículo. Para la configuración de eje simple con ruedas simples delanteras y eje simple con ruedas dobles traseras, el límite del conjunto es de 17,3 toneladas. El vehículo utilizado en esta experiencia presenta un peso bruto de 19 toneladas. Otras marcas con similares prestaciones, pero diferente tecnología, sí se ajustan a la normativa a este respecto.

Para futuras iniciativas, se debe analizar la oferta de buses con menor peso o, en su defecto, estudiar la factibilidad de modificar la normativa existente.

6/ Evaluación económica

En este capítulo se aborda la conveniencia económica para un operador actual del sistema de reemplazar la tecnología, ya sea en parte de su flota o en su totalidad.

Para esto se realiza la comparación de inversión y costos entre los buses eléctricos y los buses convencionales con motor diésel.

Resultados de la evaluación de factibilidad económica

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de factibilidad económica con la información levantada en el piloto, llamado escenario base. Posteriormente se presentan los resultados de tres escenarios simulados, modificando algunas variables relevantes.

Resultado de la evaluación de factibilidad financiera en el escenario base

En el escenario base (condiciones actuales bajo las cuales se ha analizado el piloto), el proyecto de buses eléctricos no es atractivo económicamente para un inversionista. El costo acumulado en 16 años de un bus eléctrico es USD 331.060 más alto que el de un bus diésel. Para equiparar condiciones, se debería entregar un subsidio para la compra del 43,0 % del

valor actual del bus eléctrico, esto es USD 227.708.¹³ Los resultados se presentan en el Gráfico 5, donde se observa que la principal diferencia es producto de la alta inversión y el costo financiero asociado.

Para el caso de los buses convencionales la mayor proporción del gasto es producto del consumo y el mantenimiento. El detalle de los resultados se presenta en el Cuadro 4.

La tasa de interés de los créditos para inversión es del 14 %, el impuesto al valor agregado (IVA) para buses y cargadores es del 10,5 %, el IVA para el resto de productos es del 21 % y el impuesto de importación del 35 %.

Todas las variables usadas en el escenario base se muestran en el anexo “Parámetros de la planilla Excel para evaluación de factibilidad económica”.

¹³ Este valor es menor a los USD 341.882 del resultado base por los costos financieros asociados, los cuales disminuyen por ser menor el valor del crédito necesario.

Cuadro 4.
Resultado de la evaluación de factibilidad financiera en el escenario base para una flota de 8 buses en un periodo de 16 años

Fuente: Elaboración propia.

	Buses eléctricos (USD)	Buses diésel (USD)	Diferencia (USD)	Diferencia %
Inversión	3.924.887	731.282	3.193.605	81 %
Costo financiero	1.916.372	393.724	1.522.648	79 %
Consumo energético	370.983	1.706.745	-1.335.762	-360 %
Mantenimiento y otros	227.486	959.502	-732.015	-322 %
Flota	6.439.728	3.791.252	2.648.476	41 %
Diferencia por 8 buses (USD)	2.648.476			
Diferencia por bus (USD)	331.060			
Equivalente a	2,07	buses diésel nuevos		

Escenarios y análisis de sensibilidad

Para entender la combinación de variables y como estas afectan la viabilidad económica de los proyectos, se realizaron una serie de análisis bajo algunas variaciones del escenario base. Los escenarios¹⁴ de sensibilidad usados fueron:

1 Reducción de los impuestos a la importación de los buses eléctricos y sus componentes (batería y cargador).

2 Reducción de la tasa de los créditos para la inversión de buses eléctricos (costo financiero).

3 Reducción de los impuestos de importación y de la tasa de interés de los créditos para la compra de los buses eléctricos y los componentes asociados (batería y cargador).

El resumen de los resultados se muestra en el Cuadro 5. En él se observa que la reducción del impuesto de importación y la tasa de interés tienen un impacto significativo en las diferencias de costos entre el proyecto de buses eléctricos y el de buses a diésel.

Cuadro 5.
Resumen de los resultados del análisis de sensibilidad para el comparativo de costos diferenciales entre una flota eléctrica y una diésel (8 buses)

Fuente: Elaboración propia

Costos diferenciales (USD)	Escenario base Imp. import 35 % Tasa interés 14 %	1	2	3
		Impuesto importación 0 %	Intereses crédito (tasa 5 %)	Imp. import. 0 % Tasa interés 5 %
Buses eléctricos	6.439.728	4.956.337 (-23 %*)	5.193.945 (-19 %*)	3.988.982 (-38 %*)
Buses diésel	3.791.252	3.791.252	3.791.252	3.791.252
Diferencia (%)	41 %	24 %	27 %	5 %
Subsidio requerido por bus (USD)	227.708	98.191	151.340	21.333

*Reducción en comparación con los costos del escenario base.

14 Uno de los modelos que se utiliza en otros lugares, es el arriendo (*leasing*) de las baterías. Lo anterior tiene como objetivo traspasar el riesgo de estas nuevas tecnologías a los comercializadores y fabricantes y reducir la variabilidad de los costos futuros, disminuyendo el riesgo financiero.

Gráfico 5.
Diferencial de costos por tecnología según el resultado de la evaluación de factibilidad financiera en el escenario base

Fuente: Elaboración propia.

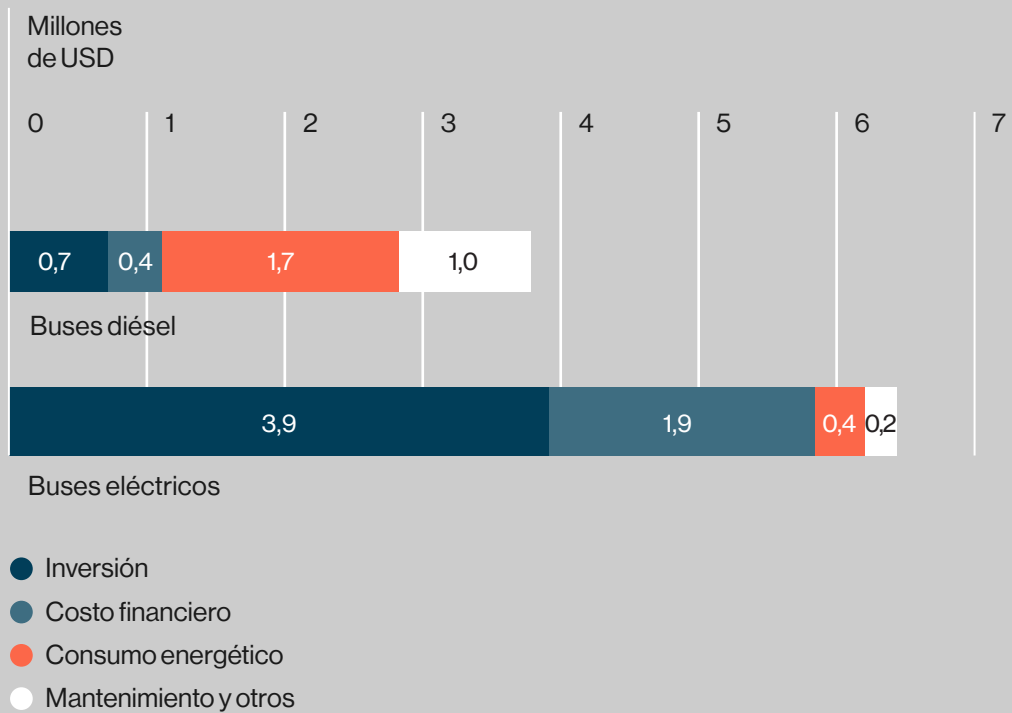
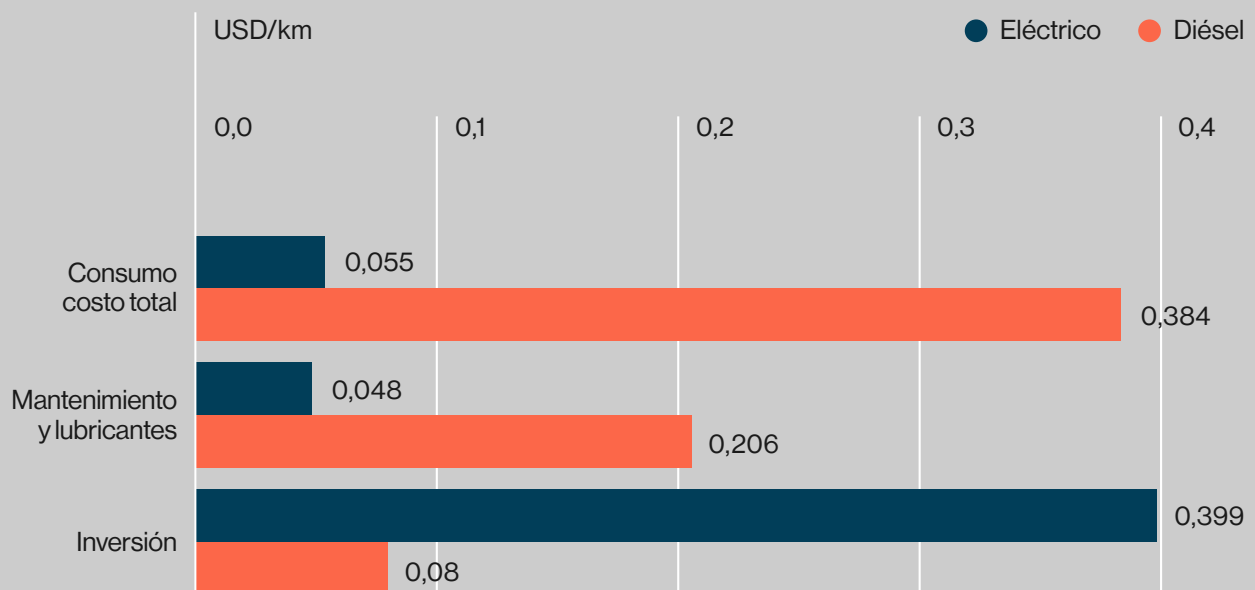


Gráfico 6.
Comparación de costos por kilómetro para buses eléctricos y buses diésel

Fuente: Elaboración propia.



Comparación de inversión y costos por kilómetro

Con el objetivo de facilitar los análisis desde el punto de vista unitario, se presentan en el Gráfico 6 los resultados de los costos por kilómetro para los principales ítems de gastos por tipo de bus. Los

costos de consumo total¹⁵ y los de mantenimiento y lubricantes son significativamente más bajos para los buses eléctricos (86 % y 77 % menor, respectivamente) que los mismos ítems para los buses diésel. Sin embargo, el costo de la inversión¹⁶ normalizado por kilómetro es casi cinco veces mayor para los buses eléctricos que para los diésel.

Recomendaciones a nivel económico

Para buscar un escenario favorable a la inversión en buses eléctricos, el sector público y el privado pueden impulsar iniciativas o crear las condiciones para acelerar el reemplazo de tecnología de sistemas basados en combustibles fósiles a eléctricos. A continuación, se mencionan algunas de ellas.

Sector público

- Estudiar la permanencia del beneficio tributario sobre las tasas de importación de los buses eléctricos, los cargadores y los paquetes de baterías. Este beneficio está a disposición, desde el año 2018, para un número definido de buses, con una vigencia de tres años, aproximándose su culminación. Para apoyar la decisión de los inversores se necesitan políticas de largo plazo.
- Estudiar la disminución del impuesto de valor agregado (IVA) para los buses eléctricos, los cargadores y los paquetes de baterías. Actualmente, ese IVA es del 10,5 %. Al ser inversiones de mayor monto, también el impuesto es mayor. Lo recaudado por el Estado en este ítem por un bus eléctrico asciende a USD 50.362; en el caso del bus diésel, se eleva a USD 15.204, es decir, este último supone el 30,2 % del IVA del bus eléctrico. Para igualar el ingreso tributario para el Estado, en valor monetario (USD 15.204), el IVA del bus eléctrico podría situarse en el 3,2 %.
- Uno de los puntos más atractivos de la tecnología eléctrica es el menor costo energético, el cual, para este análisis, llegó a ser un 20,5 % del

gasto en combustible diésel para los 16 años de operación. Por lo anterior, una política que impulse la introducción de la movilidad eléctrica consiste en mantener el precio de la energía eléctrica en un valor conocido en el largo plazo para los inversionistas de los buses eléctricos, a los que el Estado podría aplicar un subsidio en caso de ser necesario.

- Otra alternativa que puede analizar el sector público para fomentar el cambio de buses diésel con buses eléctricos es el establecimiento de subsidios directos a la compra de los buses eléctricos, de los cargadores o de los paquetes de baterías.

Sector público-privado

- Como se pudo apreciar, el costo financiero puede ser una variable importante dentro de los costos totales. Por lo anterior, es importante promover que los bancos generen ofertas atractivas para los créditos, tanto en las tasas de interés como en las condiciones crediticias (montos, plazos, garantías, etc.). Para lo anterior, puede ser importante el rol del Estado como agente garante del inversionista, disminuyendo el riesgo para los bancos, lo que puede generar mejores condiciones.
- En la misma línea del costo financiero, el Gobierno, junto con los actores privados, puede promover la participación en mecanismos de financiamiento internacionales, como el

¹⁵ Incluye el costo variable por kilómetro más el costo fijo por kilómetro. El costo variable corresponde al 97 % del gasto del costo fijo.

¹⁶ Para la inversión, se calculó la cantidad acumulada de 16 años de vida útil con valores actualizados para ocho buses de cada tecnología (no considera costos financieros). Esa cifra incluye la compra y recambio de los buses más los aportes de inversión en cada periodo. Para los buses eléctricos, incluye el recambio del paquete de baterías a los 8 años y el reacondicionamiento programado del vehículo. También comprende los valores residuales respectivos.

Fondo Verde para el Clima,¹⁷ con el objetivo de disminuir las tasas de interés para las inversiones de estas nuevas tecnologías y mejorar las condiciones de plazo.

Análisis de costos por potencia contratada

El costo fijo de la potencia contratada es un recurso importante dentro de los costos operacionales. Por lo anterior, se debe evaluar si el cambio a mayores tensiones puede mejorar las condiciones económicas del proyecto. Como se observa en el Cuadro 6, el cargo fijo es ligeramente inferior en la medida que aumenta la tensión. Lo mismo ocurre con el cargo variable, pero en el caso del cargo por potencia contratada la diferencia es significativa.

Para poder acceder a este cambio se deben tener presentes al menos dos aspectos:

- La factibilidad técnica, que depende de la infraestructura de la que dispone la empresa distribuidora en la zona geográfica de interés. Se debe realizar la solicitud de evaluación de factibilidad a la empresa distribuidora.
- El personal calificado necesario para el manejo de líneas de electricidad de mayor tensión. Para esto último, se estimó el costo adicional que supone el reemplazo de un trabajador técnico calificado por otro que no lo está (y que es parte de los trabajadores actuales). El aumento del sueldo se estimó en un 20 % (USD 2.905 al año) (Encuestas IT en la web, s. f.).

Cuadro 6. Tarifas eléctricas de Edesur

Fuente: Sitio oficial de la empresa distribuidora eléctrica Edesur.

Tarifa 3		Grandes demandas					
Concepto	Unidad	BT<300kw	MT<300kW	AT<300kW	BT>=300kw	MT>=300kW	AT>=300kW
		Potencia contratada	Potencia contratada	Potencia contratada	Potencia contratada	Potencia contratada	Potencia contratada
Cargo fijo	\$/mes	4.439,38	4.434,64	4.418,69	4.439,38	4.434,64	4.418,69
Cargo por potencia contratada	\$/kW-mes	306,61	132,47	34,26	306,61	132,47	34,26
Cargo por potencia adquirida	\$/kW-mes	62,43	77,55	76,08	62,43	77,55	76,08
Cargo variable pico	\$/kWh	2.488	2.368	2.274	3.522	3.351	3,217
Cargo variable resto	\$/kWh	2.383	2.268	2.179	3.374	3.211	3.082
Cargo variable vale	\$/kWh	2.279	2.17	2.084	3.225	3.069	2.947

17 El Fondo Verde del Clima (FVC) fue creado en 2010 por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con el objetivo de contribuir de manera significativa y ambiciosa a las metas impuestas por la comunidad internacional para combatir el cambio climático. La misión del Fondo es promover el cambio de paradigma hacia un desarrollo con bajas emisiones y resiliente al clima mediante el apoyo a los países para limitar o reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse a los impactos del cambio climático.

En el Cuadro 7 se muestra el ahorro calculado por cambiar de tipo de potencia contratada para 170 kW, lo que significa que:

- Si se cambia de baja tensión a media tensión, el precio unitario disminuye un 56,8 %. Monetariamente esto equivale a USD 423 por mes (USD 5.075 al año), que deduciendo el costo adicional del trabajador calificado, da un ahorro anual de USD 2.170. Esto es USD 16.977 en valor presente para los 16 años de proyecto.
- Si se pasa de baja tensión a alta tensión, el precio unitario disminuye un 89 %. Monetariamente esto equivale a USD 661 por mes (USD 7.937 al año), que descontando el costo adicional del trabajador calificado, da un ahorro anual de USD 5.032. Esto es USD 39.032 a valor presente para los 16 años de proyecto.

Cuadro 7. Diferencias por cambio de contrato de potencia

Fuente: Elaboración propia.

Tipo	Precio año (USD)	Cambio de BT (USD año)
Baja Tensión	8.935	-
Media Tensión	3.861	-5.075
Alta Tensión	998	-7.937



7/ Evaluación ambiental

Esta sección presenta los positivos impactos ambientales que se han obtenido tras la operación de los buses bajo seguimiento.

Resultados del monitoreo

Reducción en emisiones de GEI

El sector del transporte representa aproximadamente el 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la ciudad de Buenos Aires (Agencia de Protección Ambiental, 2017). El cálculo de reducción de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂e)¹⁸ se realiza comparando las emisiones de un bus convencional a diésel y las utilizadas para generar la electricidad de un bus eléctrico. En el Gráfico 7, se pueden observar las emisiones de CO₂e evitadas por los dos buses eléctricos en los 10 meses de monitoreo.

Se estima que en los 10 meses de operación, la emisión de CO₂ disminuyó de las 140,2 toneladas que habrían generado dos buses convencionales a las 53,6 toneladas atribuibles a los dos vehículos eléctricos, lo que representa una reducción de un

62 %. Considerando el escenario base de recambio de flota de ocho buses descrito en la sección “Evaluación económica”, se estima que en 16 años de operación se podría evitar la emisión de unas 6.651 toneladas de CO₂.¹⁹ Este valor equivale a la siembra de 15 hectáreas de bosque, teniendo en cuenta un periodo de 16 años.²⁰

Reducción en emisiones de otros gases contaminantes

El reemplazo de buses convencionales diésel por eléctricos conlleva también reducciones en la emisión de otros gases tóxicos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) prioriza tres contaminantes primarios atmosféricos, según su impacto sobre la salud humana:²¹

18 El CO₂e es una medida universal utilizada para indicar la posibilidad de calentamiento global de cada uno de los GEI y evaluar, así, los impactos de la emisión (o evitar la emisión) de diferentes gases que producen el efecto invernadero.

19 Este valor asume una misma matriz energética para producir la electricidad a través del tiempo. El factor de emisión debería actualizarse a medida que ingresan nuevas fuentes de generación eléctrica, ya sean estas basadas en combustibles fósiles o en energías renovables.

20 Calculado con base en las estimaciones realizadas por Trees.org for the Future (s.f.).

21 Dentro de estos contaminantes no se incluye el ozono ya que es un contaminante secundario, es decir, no se emite directamente por los procesos de combustión, sino que se forma por la reacción al sol de ciertos precursores, como el NOx y compuestos orgánicos volátiles distintos al metano (COVNM), mediante un proceso fotoquímico.

– **Material particulado (MP).** Son partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Se clasifica según su diámetro aerodinámico en MP10 (diámetro inferior a 10 micrones) y MP2,5 (diámetro inferior a 2,5 micrones). Las emisiones de MP10 suelen tener un importante componente de tipo natural. El transporte terrestre aporta un mayor porcentaje de las emisiones totales de MP2,5. Estas últimas tienen un impacto más severo que las de MP10 sobre la salud humana debido a que, por su menor tamaño, afectan a todo el sistema respiratorio. La inhalación de estos contaminantes pueden provocar cáncer, asma, alergias y enfermedades respiratorias o cardiovasculares.

– **Óxidos de nitrógeno (NOx).** Denominación que engloba el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). La principal fuente antropogénica de este contaminante son las emisiones de procesos de combustión. Según la OMS, el dióxido de nitrógeno (NO₂) causa síntomas de bronquitis en personas asmáticas y afecciones pulmonares. Por otro lado, es el agente principal de la formación de aerosoles de nitrato, los cuales forman una importante fracción del MP2,5. En presencia de luz ultravioleta, genera ozono.

– **Dióxido de azufre (SO₂).** La principal fuente antropogénica es la quema de combustibles que contienen sulfuro. Este contaminante afecta el sistema respiratorio y causa irritación en los ojos. Además de su efecto sobre la salud humana, también es fuente de lluvia ácida al reaccionar con el agua.

En el Cuadro 8 se presentan las emisiones de estos contaminantes principales evitadas por los buses eléctricos.

**Cuadro 8.
Emisiones de gases contaminantes evitadas por 2 autobuses eléctricos en los 10 meses de operación**

Fuente: Elaboración propia con base en factores de emisión de la AEMA (2017).

MP (kg)	NOx (kg)	SO ₂ (kg)	COVNM (kg)
4,84	323,76	0,44	2,31

Considerando estos valores, se pueden proyectar las emisiones evitadas para el escenario base de recambio de flota de ocho buses diésel por eléctricos durante un periodo de 16 años, obteniéndose los valores del Cuadro 9.²²

**Cuadro 9.
Emisiones de gases contaminantes evitadas por una flota de 8 buses eléctricos durante 16 años**

Fuente: Elaboración propia con base en factores de la AEMA (2017)

MP (kg)	NOx (kg)	SO ₂ (kg)	COVNM (kg)
371,8	24.864,6	33,8	177,0

La estimación del costo social de estos contaminantes requiere de estudios exhaustivos sobre el sector de la salud según diversos parámetros. Debido a la falta de datos y estadísticas en países de América Latina, se adoptan los indicadores europeos reportados por Ricardo-AEA (2014). Según esto, las emisiones de contaminantes criterio evitadas con el recambio de ocho buses diésel por eléctricos durante un periodo de 16 años generaría un ahorro aproximado de USD 428.000.

Reducción en niveles de ruido

El ruido es considerado como un contaminante que crea problemas de creciente importancia en la sociedad, especialmente en las grandes ciudades y en zonas industriales. Puede ser causa de una menor productividad y de alteraciones en los patrones de sueño (Ardanuy Ingeniería, S. A., 2019).

Un estudio realizado por Volvo (2016) ilustra la diferencia en niveles de ruido entre un bus eléctrico y un bus híbrido a diésel, reflejada en el Gráfico 8.

Según el mismo estudio, un bus diésel convencional emite 6 decibelios (dB) más que un bus eléctrico cuando ambos están en modo arranque. En los resultados del estudio se observa que la diferencia en emisión de ruido es mayor a una velocidad de aproximadamente 20 km/h. Sin embargo, los niveles de emisión

22 Se debe considerar que, a los ocho años, los buses diésel se reemplazan, lo cual podría incluir una mejora tecnológica en las emisiones de estos nuevos buses convencionales, modificando los valores proyectados.

Gráfico 7.

Emisiones de CO₂e asociadas con los 2 buses en seguimiento en los 10 meses de operación en comparación con emisiones de buses diésel

Fuente: Información recolectada por la línea y tratada por el equipo consultor utilizando factores de emisión de la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la CMNUCC (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015).

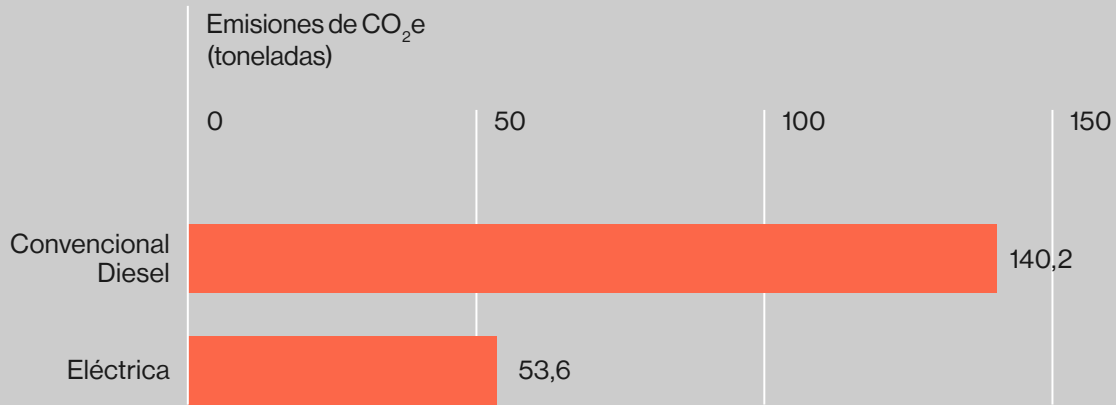
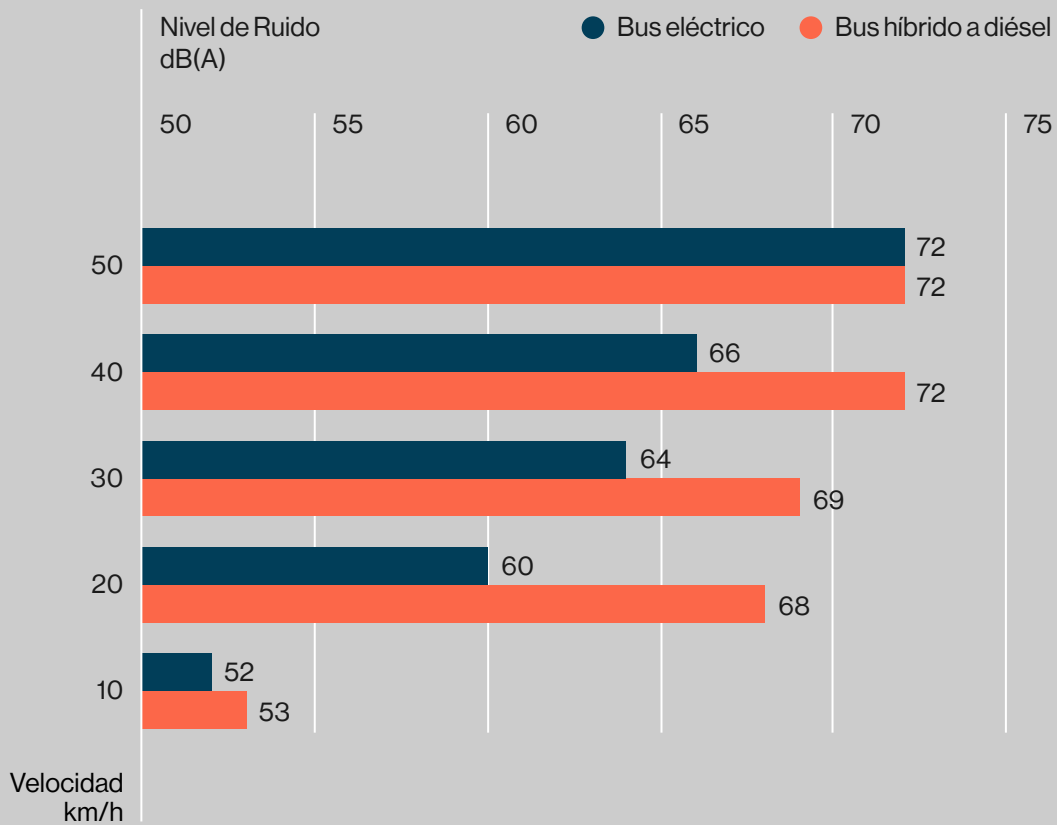


Gráfico 8.

Nivel de ruido en el exterior del bus a velocidad constante

Fuente: Volvo (2016)



de ruido entre ambos trenes motrices son los mismos a velocidades mayores a 50 km/h debido a que la fuente principal del ruido deja de ser el motor y pasa a ser el ruido generado por el viento y el roce de las ruedas contra el asfalto (Volvo, 2016).

Un estudio similar que compara buses eléctricos a celda de combustible con buses diésel indica que la diferencia en emisión de ruido puede llegar a ser de hasta 14 dB(A) (Laib, Braun, y Rid, 2019). Comparativamente, las emisiones de ruido de un vehículo híbrido son menores a las de uno convencional, pero mayores a las de un vehículo eléctrico.

Adicionalmente, los pasajeros tienen un mayor confort debido a la reducción en los niveles de ruido, lo que hace que el bus eléctrico sea más

atractivo en términos operativos. Esto es un factor importante teniendo en cuenta que gran parte de la reducción de emisiones de GEI se logra mediante el cambio modal, disminuyendo el uso del vehículo particular, pero mejorando a la vez el servicio de transporte público.

Realizando una estimación del costo social por el ruido con los indicadores europeos reportados por Ricardo-AEA (2014), se obtiene que la reducción del ruido por el recambio de ocho buses diésel por eléctricos durante un periodo de 16 años generaría un ahorro aproximado de USD 160.000.²³

La OMS recomienda limitar la exposición al tráfico de vehículos a 53 dB, pues una exposición por encima de este nivel se asocia con efectos adversos para la salud (OMS, 2018).

Recomendaciones a nivel ambiental

La segunda vida de las baterías

Con la creciente demanda de baterías para electromovilidad, la explotación de recursos primarios para la fabricación de nuevas baterías ha aumentado significativamente. Este aumento se traduce en un riesgo directo sobre la integridad de varios ecosistemas y agrava el impacto social por el riesgo de violaciones de derechos humanos en países en desarrollo²⁴ (UNCTAD, 2020). La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés) predice que se venderán cerca de 23 millones de vehículos eléctricos en la próxima década.

Debido a esto, la UNCTAD recomienda el desarrollo de mejores prácticas de extracción de minerales junto con el reciclaje y la reutilización de baterías. La Figura 4 muestra el ciclo de vida de una batería de un VEB.

Al finalizar su primera vida en un VEB, la batería retiene del 50 % al 90 % de su capacidad, por lo que es útil en aplicaciones de almacenamiento estacionario (Capgemini, 2019). El proceso de remanufactura incluye pruebas de rendimiento y el posterior desmantelamiento y reensamblaje en módulos homogéneos.

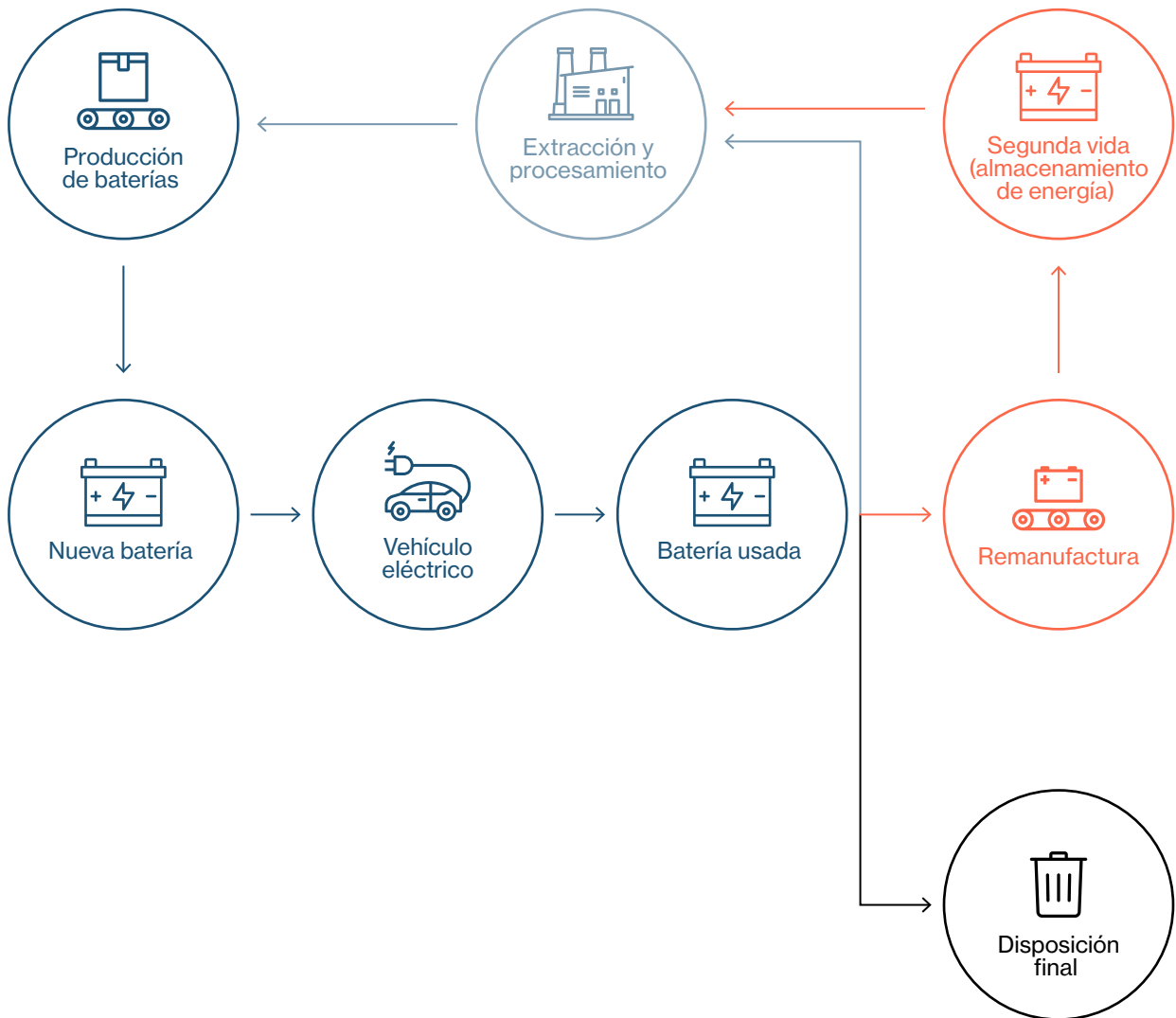
Se estima que el costo de reutilizar la batería de un bus eléctrico para aplicaciones de almacenamiento estacionario es de aproximadamente USD 49/kWh. Este costo incluye la remanufactura, costos de transporte y otros gastos generales para adaptar las baterías a las nuevas aplicaciones (Ardanuy Ingeniería, S. A., 2019).

²³ Tomando el costo promedio producido por el ruido en tráfico ligero y denso de autobuses durante el día y la noche, y asumiendo una reducción del 18 % en la emisión de ruido, según Laib, Braun y Rid (2019), para un ahorro aproximado de 0,018 USD/km.

²⁴ Las acusaciones de abusos están relacionados con la extracción de los minerales necesarios para la fabricación de productos electrónicos y vehículos eléctricos, entre ellos las baterías de iones de litio.

Figura 4.
Ciclo de vida de una batería de vehículo eléctrico

Fuente: Adaptado de McKinsey (2019).



Para un eventual ingreso masivo a futuro de las tecnologías eléctricas, se debe tener presente la necesidad de facilitar un mercado secundario de baterías. Para favorecerlo, se proponen las medidas expuestas en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Recomendaciones para el desarrollo de mercados secundarios de baterías en Argentina

Fuente: Análisis de Inicio para el Banco Mundial (2020).



1. Creación de un registro nacional de baterías

Actualmente existe poca estandarización en el mercado de baterías respecto a forma, conectores, información entregada, etc. Teniendo en cuenta esto, un registro nacional de baterías permitiría conocer la materia prima disponible y hacer proyecciones de disponibilidad de baterías de segundo uso. Esta información es útil para poder desarrollar modelos de aprovechamiento de acuerdo con las características funcionales y físicas de cada una de las baterías existentes en el mercado.

Este registro permitiría, además, democratizar el acceso a los propietarios de los vehículos por parte de las empresas interesadas en desarrollar negocios de segunda vida, según el interés objetivo del negocio.



2. Implementación de un sistema de trazabilidad

La trazabilidad permite conocer la vida de la batería, las condiciones a las que han sido sometidas y cuáles han sido sus usos. Esta información facilita la definición del valor residual de las baterías, haciendo las transacciones menos riesgosas, ya que las prestaciones de estos productos en su segunda vida dependen en gran medida de la primera.

Una forma de implementar este sistema es incluir la lectura de parámetros de vida de las baterías en el sistema de seguimiento de una flota de buses. La información recolectada debería volcarse en un repositorio centralizado a cargo de un ente gubernamental o alguna asociación gremial.

Finalmente, un sistema como este permitiría a las empresas interesadas en adquirir baterías para segunda vida conocer cuáles se están aproximando al 80 % de su capacidad y contactar a sus dueños, además, de proyectar las inversiones necesarias.



3. Caracterización de las baterías

Con cada cambio tecnológico, las capacidades y comportamientos de las baterías también cambian. Adicionalmente, hoy en día existen varios modelos de baterías y fabricantes. En ese sentido, la caracterización de las baterías permitiría mitigar el riesgo de las empresas que operen entregando una segunda vida a las baterías.

Para la caracterización, es necesario que un ente gubernamental o centro de investigación desarrolle o adquiera bancos de prueba, que permitan categorizar las respuestas de las baterías, según su tipología, variables constructivas, modelo, etc.



4. Responsabilidad extendida del productor

La ley que regula la responsabilidad extendida del productor se encuentra actualmente como proyecto de ley en la Cámara de Diputados de la Nación (expediente 1874-D-2019).

En esta ley se destaca el principio "de la cuna a la cuna". Este enfoque está directamente relacionado con la segunda vida de las baterías, ya que está destinado a idear, diseñar y producir de forma que los elementos que componen los productos, bienes y servicios puedan ser sustentablemente reutilizados y valorizados en todas las etapas de su ciclo de vida.

En el caso de que la batería no pueda ser reutilizada, reciclada o valorizada, el productor será responsable de su gestión, desde la generación hasta su disposición final. Por lo tanto, otra medida para impulsar segundos y terceros usos de las baterías contenidas en vehículos eléctricos sería impulsar y fortalecer el desarrollo de esta ley.



5. Flexibilización y ampliación de normativas

Se recomienda que la normativa asociada a la distribución energética se flexibilice y amplíe en torno a aplicaciones de respuesta a la demanda, la cogeneración con diferentes señales tarifarias para la inyección, la tarificación por bloques y según la presencia del recurso energético, la regulación para servicios complementarios, etc.

Estas prácticas han impulsado la reutilización de baterías en países europeos y estados de EE. UU., como California.

8/ Revisión de las mejores prácticas en proyectos de buses eléctricos

En esta sección se presentan las mejores prácticas en proyectos de buses eléctricos en tres ciudades de Latinoamérica.

Cuadro 11.
Mejores prácticas en proyectos de buses eléctricos

Fuente: Análisis de Inicio para el Banco Mundial (2020)

Ubicación	Operador	Descripción
Medellín, Colombia	Metroplus	65 buses BYD K9GA <ul style="list-style-type: none">- El proyecto tiene una estructura de financiamiento pública. La compra de los buses ha sido realizada por Metroplus, con una inversión cercana a los USD 20 millones.- Este proyecto permite analizar el funcionamiento de buses eléctricos en ciudades con alto relieve. Gracias a esto, es posible analizar el rendimiento y las mejoras en la regeneración necesarias para los buses en zonas con alta exigencia. También demuestra la necesidad de calcular correctamente el sistema de propulsión de los buses, ya que una versión con condiciones normales, según el diseño utilizado en China, no podría haber operado en esta ciudad.- El proyecto de Medellín es uno de los primeros en los que existe un financiamiento público exclusivamente, por lo que hará posible analizar las implicancias de un proyecto de este tipo.- La particularidad de Medellín es que tiene un sistema de transporte que integra metro, buses, teleférico y taxis.
Montevideo, Uruguay	CUTCSA	30 buses BYD K9W <ul style="list-style-type: none">- Implementación de un sistema de gestión que controla los cargadores y considera tres segmentos horarios (valle, llano y punta)- Tipo de financiamiento mixto. El Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) habilitó a varias empresas de transporte, entre ellas Cutcsa, a acceder al subsidio económico para cambiar los ómnibus convencionales por eléctricos. Este subsidio cubre la diferencia de precio entre un vehículo diésel y uno eléctrico de dimensiones similares.

Continúa →

Ubicación	Operador	Descripción
Santiago, Chile	Metbus	<p>100 buses BYD K9FE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Financiamiento por ENEL-X, pagado como arrendamiento por Metbus. - Implementación de energía a través de un sistema que controla los cargadores, lo que permitió operar con un costo bajo y adecuarse a las condiciones de la red eléctrica. - Es uno de los primeros proyectos en América Latina con grupos de carga masiva en corriente alterna (CA), y es el primer despliegue masivo de buses BYD en Chile y en la región. - Este electroterminal permitió definir parámetros de diseño para zonas de recarga con base en grupos de carga masiva en CA. - El proyecto permitió validar la operación de buses BYD en despliegues masivos fuera de China y tener información sobre mejoras a realizar (por ejemplo, la necesidad de habilitar el freno regenerativo al 99 % del SOC y no al 95 %). Sirvió también para la validación de los costos, la estrategia de carga y otras variables de operación en el ámbito de los buses eléctricos en Chile. - Este proyecto dio cuenta a la autoridad de la necesidad de legislar con respecto al tipo de carga, para poder tener infraestructura interoperable en el sistema de transporte. - Uno de los grandes problemas del proyecto fue el diseño térmico de los cargadores, los cuales comenzaron a fallar como consecuencia de las altas temperaturas imperantes en Santiago. Para reducir este riesgo, es importante considerar el diseño térmico de los gabinetes. - El electroterminal se encuentra en bajada y los buses utilizan la regeneración como complemento al freno. En este proyecto fue posible detectar que no es recomendable la carga al 100 % cuando la salida es en bajada, ya que los frenos sufren un mayor desgaste y se desperdicia la energía regenerada por el frenado. - Uno de los puntos más importantes de este proyecto es que generó un nuevo modelo de financiamiento, en el cual un actor privado financia con el respaldo del Estado. Sin embargo, este proyecto no tuvo costo para el Estado con respecto a la inversión inicial.
	Vule	<p>75 buses Yutong ZK6128 BEVG (E12LF)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Financiamiento por Engie, pagado como arrendamiento por Vule. - En este proyecto se realizó la gestión de energía a través de interruptores automatizados para conexión, lo que elimina la alimentación de los cargadores en hora de alto costo. - El electroterminal permitió definir parámetros de diseño para zonas de recarga basados en grupos de carga masiva en corriente directa (CD). Al usar una mayor escala, es posible medir y establecer parámetros más óptimos que los observados en iniciativas piloto con pocos buses. - Este proyecto permitió validar la operación de buses de un motor, como los Yutong, en despliegues masivos fuera de China y tener información sobre mejoras a realizar. - En el terminal, se considera una estrategia de instalación y operación de los cargadores, de manera que los cables no toquen el suelo y así, evitar desgaste por roce.
	STP	<p>25 buses Yutong ZK6128 BEVG (E12LF)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Financiamiento por Engie, pagado como arrendamiento por parte STP. - La realización de este terminal deja como aprendizaje la necesidad de contar con altos estándares en la construcción del recinto de carga, ya que ha tenido una serie de problemas; por ejemplo, su anegación con aguas lluvia.
	STP	<p>215 buses Foton BJ6123EVCA</p> <ul style="list-style-type: none"> - Financiamiento por una sociedad con propósitos específicos (en inglés <i>special purpose vehicle</i> o SPV) entre COPEC, Kaufmann y otros miembros, pagado como arrendamiento por STP. - Este proyecto se realizará con una marquesina de carga, lo que implica que los cargadores irán en un segundo nivel. A pesar de no estar operativo aún, será un modelo de implementación para proyectos en los que el espacio para recarga es muy restringido. - Es el primer proyecto masivo en América Latina que utiliza el estándar del sistema de carga combinado (CCS, por sus siglas en inglés). - Debido a que los cargadores se encuentran en un segundo piso, este proyecto cuenta con gestión energética e integración a muy bajo nivel, pues el acceso está restringido a los operadores de la carga. - En este proyecto se utilizará un sistema retráctil para la manipulación de los cables de carga. - Este proyecto permitirá validar la operación de buses Foton en despliegues masivos fuera de China.



9/ Cobeneficios

- El bus eléctrico permite reducir en un 62 % las emisiones de CO₂ y en un 100 % las emisiones de material particulado,²⁵ óxidos nitrosos, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles distintos al metano.
- Las emisiones de contaminantes evitadas con el recambio de ocho buses diésel por el mismo número de vehículos eléctricos durante un periodo de 16 años generaría un ahorro aproximado en el sistema de salud de USD 428.000.
- Dados los menores niveles de ruido del bus eléctrico y la mayor continuidad en la tracción, debido a la transmisión variable, el conductor disfruta de un viaje más agradable que en un bus convencional. Esto puede favorecer su salud, reduciendo los episodios de estrés. La disminución en los niveles de ruido con el recambio de ocho buses diésel por eléctricos durante un periodo de 16 años generaría un ahorro en el sistema de salud aproximado de USD160.000.
- La posibilidad de un incendio en un vehículo eléctrico es igual o ligeramente menor a la de un vehículo convencional diésel. Los incendios de vehículos eléctricos requieren de medidas especiales para extinguir el fuego.

²⁵ Un vehículo eléctrico evita la emisión de material particulado proveniente del proceso de combustión. Sin embargo, tanto el vehículo convencional como el eléctrico emiten un porcentaje de material particulado debido al desgaste de llantas y frenos.

10/ Riesgos

- Es posible que no existan por un tiempo las competencias humanas necesarias para dar mantenimiento a los vehículos eléctricos. Se recomienda que los contratos con el proveedor de las tecnologías eléctricas incluyan el servicio de mantenimiento, estableciendo de antemano los costos que se aplicarán.
- También es posible que no exista disponibilidad de potencia en la red eléctrica para ciertas operaciones. Esto pudiera hacer inviables algunos proyectos, dificultando la introducción de la tecnología.
- Algunas variables de costos de la energía, tanto la eléctrica como la diésel, pueden tener una variabilidad no deseada desde el punto del inversionista. Para disminuir este riesgo, se pueden aplicar subsidios o estabilizadores de precios.

11/ Recomendaciones

Aspectos particulares a considerar en el momento de la adquisición

- Dado el desarrollo que está teniendo la introducción de buses eléctricos en el transporte público en otros países de la región, se recomienda que personas del sector público y privado ligados al transporte conozcan y estudien estos casos. Esto les permitirá visualizar las adaptaciones necesarias para su realidad y facilitar la introducción de buses eléctricos en Argentina.
- En los últimos años, se ha visto un rápido avance de las nuevas tecnologías aplicadas a los vehículos eléctricos. Las mayores densidades de energía de las baterías, entre otras mejoras, hacen necesaria una evaluación caso por caso para escoger las características de la flota que mejor se adaptan a las condiciones de operación que se busca satisfacer, evaluando el costo-beneficio de cada opción.
- Toda evaluación económica debe considerar las pérdidas inherentes del proceso de carga y no sólo el consumo esperado en el banco de baterías. Este error subestimaría los costos operacionales en energía. En este proyecto, estas pérdidas ascienden al 13,6 %.
- El peso total del bus tiene una influencia directa en el consumo: a mayor peso mayor consumo de energía. Es de esperar que los fabricantes sigan trabajando en esta línea, por lo que, al cotizar una nueva flota, se debe analizar si, para las mismas prestaciones, se puede seleccionar un modelo de menor peso.
- La potencia del cargador determinará el tiempo en que es posible cargar el vehículo, periodo durante el cual el bus no está disponible para operar. Se deben considerar estos periodos en el momento de proyectar la operación y cuándo se realizarán las cargas para determinar así la cantidad de terminales necesarios.
- El cargador tiene una incidencia directa en el consumo de energía, acotada por la eficiencia de este equipo. El valor de eficiencia ofrecido por el fabricante debe ser considerado a la hora de evaluar la compra, pues una de bajo costo podría ir en desmedro de la eficiencia, incrementando los costos operacionales.
- Se deben tener presentes las exigencias establecidas por el fabricante para mantener válida la garantía sobre el bus, particularmente sobre el paquete de baterías. Una restricción respecto al SOC mínimo, los ciclos de carga y descarga o los kilómetros recorridos podría reducir la vida útil esperada para el vehículo, u obligar a reducir el uso, no satisfaciendo lo esperado en una proyección inicial.
- Se pueden considerar opciones de arriendo de baterías, en las que estas son propiedad del fabricante, quien se compromete a reemplazarlas al llegar a cierto nivel máximo de degradación. Esto también ayuda a que el desembolso de dinero por la compra no recaiga originariamente en el inversionista, favoreciendo la evaluación económica. Además, esto reduce los riesgos tecnológicos.

- Se puede considerar un arrendamiento operacional, por el cual el fabricante se compromete a dar un servicio de mantenimiento con base en una tarifa relativa a los kilómetros recorridos. Aunque puede ser más caro para el

operador, este no se debe preocupar de tener personal capacitado ni *stock* de repuestos para potenciales desperfectos, y podrá centrarse principalmente en entregar un buen servicio de transporte de pasajeros.

Aspectos técnicos

- Dado el impacto del consumo de los sistemas auxiliares, de hasta un 12 %, es recomendable llevar un monitoreo para generar tendencias según las condiciones de operación y corregir desviaciones respecto a lo esperado. Si bien se podría concluir que no es necesario gestionar estos elementos en épocas “fuera de temporada” (aire acondicionado en invierno y antihielo en verano), no se descarta la posibilidad, y quizás se aumenta la probabilidad, de que sea justamente en esas épocas cuando se hace un mal uso, debido a la falta de adaptación o una adaptación tardía a las condiciones ambientales cambiantes durante el año.
- A la hora de realizar proyectos piloto, que podrían ejecutar el mismo operador a medida que va adquiriendo nuevos buses, se debe permitir una completa flexibilidad respecto a los horarios, los conductores, las rutas y cualquier otra variable que tenga una influencia en el consumo de energía o en otro parámetro de interés. De esta manera, se reduce el tiempo necesario para las pruebas y se aumenta la certidumbre de los resultados.
- Se deben establecer criterios para determinar la autonomía esperada para cada temporada y

definir medidas de contingencia para aquellos días en que se prevea que no se logrará cumplir con la cantidad de kilómetros estipulados.

- Se debe considerar que, a medida que la batería va incrementando su nivel de degradación, su autonomía irá reduciéndose, lo cual afectará directamente la operación proyectada, haciendo necesarias más detenciones para cargar y así lograr satisfacer las horas de trabajo requeridas.
- Para evaluar la factibilidad técnica, se debe considerar cuál es la potencia energética necesaria en la localización deseada para instalar los cargadores. Es posible que no exista dicha factibilidad, o que esta solo esté disponible en horarios de menor demanda. Esto podría invalidar totalmente un proyecto, por lo que debe ser considerado en una etapa temprana del mismo.
- Se deben tener en cuenta también los permisos de carácter ambiental necesarios para una instalación de mayor potencia. Estos deben ser incorporados en la evaluación técnica y en los plazos necesarios para la ejecución del proyecto de implementación de buses eléctricos.

Aspectos de gestión de la operación

- Se recomienda mantener un programa de capacitación que permita refrescar los conceptos de buenas prácticas para los conductores. Dada la importante influencia que pueden tener estos en el consumo de energía, una operación eficiente por parte de los conductores puede incrementar la autonomía que es posible obtener en la operación.

- La creación y seguimiento de indicadores apropiados permitirá gestionar la operación del vehículo, tanto desde el punto de vista del mantenimiento como de las buenas prácticas de los conductores. Para el caso de las capacitaciones, pueden ser mejor enfocadas en cuanto a contenidos y participantes si se cuenta con buena información.

- Se recomienda llevar registros, al menos manuales, y deseablemente electrónicos, para realizar la gestión de la operación, particularmente sobre el desempeño de los conductores. Los registros deben ser analizados y evaluados regularmente, por lo que se debe seleccionar el nivel de profundidad que estos tendrán, según la capacidad del área de gestión de la empresa. Esta deberá contar con profesionales mejor preparados cuanto mayor sea el tamaño de la flota eléctrica.
- Si se utilizaran registros dispuestos por el fabricante, se deben establecer en el contrato condiciones para asegurar la disponibilidad de los mismos en plazos razonables para realizar una gestión proactiva.
- Se recomienda llevar un registro de las operaciones de carga y realizar análisis sobre estas, para identificar tendencias en la energía necesaria para la operación y los tiempos que toma la carga.

Aspectos económicos

- Para las distintas variables que influyen en el modelo económico, se deben buscar condiciones favorables para obtener escenarios económicos factibles. El objetivo es que la introducción de buses eléctricos sea conveniente económicamente para un operador de buses actual. Con esto se puede acelerar el ingreso de buses eléctricos en el sistema de transporte público de la ciudad de Buenos Aires. Los escenarios favorables, por orden de importancia, según los análisis realizados en este estudio, son:
 1. La disminución en los precios de la nueva tecnología. Se puede lograr mejorando la competitividad en los precios de venta o en la reducción de impuestos asociados.
 2. La mejora de las condiciones crediticias para disminuir los costos financieros asociados a la inversión.
- Los costos energéticos variables, es decir, aquellos asociados al consumo directo por operar, son un 86 % más bajos para los buses eléctricos que para los buses diésel, por lo tanto, es conveniente dar a la flota eléctrica más prioridad que a la convencional en la operación. En la medida que se puedan reemplazar, hay que priorizar esta alternativa. Se debe tener presente que los costos fijos ya están incorporados y no varían con esta opción. Según los supuestos realizados, los buses circulan seis días a la semana. Si lo hicieran los siete días, las distancias recorridas podrían aumentar en 11.831 km/año, con un ahorro directo anual de USD 3.940 por bus.²⁶
- Para países en vías de desarrollo, se tiene la oportunidad de presentar iniciativas público-privadas a fondos verdes con el objetivo de mejorar las condiciones de financiamiento y recibir apoyo en asesorías relacionadas con la introducción de nuevas tecnologías. Lo anterior puede cambiar la conveniencia del proyecto desde el punto de vista del inversor.
- Es importante involucrar a los fabricantes y comercializadores, tanto en las garantías como en los potenciales modelos de negocio (arriendo de las baterías y contrato de mantenimiento, entre otros). El objetivo es que los participantes compartan los riesgos tecnológicos, disminuyéndolos para los operadores de buses.

²⁶ En el análisis se debe considerar cómo esto influiría en el incremento de ciclos de carga y descarga en la batería, lo que impacta directamente en su degradación y, consecuentemente, en su autonomía. También se deben revisar las condiciones necesarias para no poner en riesgo la garantía dada por el fabricante, en caso de que esta dependa del número de ciclos.

12/ Conclusiones

- En este proyecto piloto, los buses han cumplido con la operación de forma satisfactoria, transportando una cantidad igual o superior de pasajeros que el bus convencional diésel tomado como referencia, y recorriendo las distancias necesarias.
- Tanto los conductores como los pasajeros han recibido favorablemente esta nueva tecnología. El menor ruido, el buena aislamiento térmico y la transmisión continua de velocidad incrementan la comodidad del viaje.
- Las principales variables que afectan el consumo de energía, para las condiciones de operación en Buenos Aires, son el estilo de operación del conductor; la temperatura ambiente, principalmente la asociada a la mayor demanda de energía de los dispositivos auxiliares; la cantidad de pasajeros transportados, y la velocidad media del viaje.
- La energía recuperada representa aproximadamente un 43 % de la energía total utilizada para la operación de los buses.
- Durante casi ocho meses, los buses fueron cargados dos veces al día, lo cual aseguró su autonomía. Cuando fueron cargados una sola vez por jornada, hubo algunos días en los que no pudieron recorrer la totalidad de los kilómetros previstos.
- El bus eléctrico en Buenos Aires permite reducir parcialmente las emisiones de gases de efecto invernadero y de forma casi total otros contaminantes. Una mayor participación de las energías renovables en la red eléctrica aportaría mayores reducciones de gases de efecto invernadero.
- A la fecha de cierre de este proyecto, aún existen aspectos normativos que limitan la introducción de algunos modelos eléctricos debido a su mayor peso bruto. Es de esperar que este aspecto mejore con el avance de la tecnología, con materiales más apropiados y baterías de mayor densidad energética. De no ser así, sería necesario estudiar modificaciones en la normativa para incrementar la oferta, lo que podría reducir los precios.
- En las condiciones de la simulación económica de base, el resultado económico para los buses eléctricos es negativo con respecto a los buses diésel, no siendo conveniente financieramente desde el punto de vista del inversionista. Para cambiar este escenario adverso para el operador de buses, una alternativa es la entrega de un subsidio en la compra para compensar la diferencia. Otros mecanismos pueden ser la disminución en los impuestos o mejorar las condiciones de financiamiento. En los escenarios realizados, se apreció que se puede necesitar más de una iniciativa para hacer factible un proyecto de buses eléctricos en Buenos Aires.
- La principal diferencia económica al comparar los dos proyectos, buses eléctricos y buses convencionales, se presenta a favor de los primeros al analizar los menores costos en el consumo energético y de mantenimiento. Para el caso de los buses diésel, los favorece una menor inversión y el costo financiero asociado.
- Este piloto fue un punto de partida para el impulso de la adopción de nuevas tecnologías. Se demuestra que los buses tienen un comportamiento operacional normal, ofrecen comodidad en el servicio, tanto para pasajeros como conductores, son eficientes desde el punto de vista energético, menos contaminantes y, con algunos cambios en las condiciones de compra y financieras, pueden ser factibles en el ámbito económico.



13/ Bibliografía

AEA (2012). *Reglamentación sobre atmósferas explosivas AEA 90079-14*. Asociación Electrotécnica Argentina.

AEMA (2017). *EMP air pollutant emission inventory guidebook 2016. Última actualización, junio de 2017*. Agencia Europea de Medio Ambiente.

Agencia de Protección Ambiental (2017). *Inventario de gases de efecto invernadero*. Secretaría de Ambiente Argentina, Buenos Aires.

Ardanuy Ingeniería, S. A. (2019). *La electromovilidad en el transporte público de América Latina*. Vicepresidencia de Infraestructura. CAF. Disponible en <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1466>.

Banco Mundial (2020). *Evaluación técnica de impactos asociados a la penetración de vehículos eléctricos conectados a la red de distribución de ciudades argentinas seleccionadas*.

Bloomberg Finance L.P. (2018). *Electric buses in cities - Driving towards cleaner air and lower CO2*. Disponible en <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>.

Capgemini (2019). *Second life batteries: A sustainable business opportunity, not a conundrum*. Disponible en https://www.capgemini.com/2019/04/second-life-batteries-a-sustainable-business-opportunity-not-a-conundrum/#_ftn3

CNN Business (2018). *Are electric cars more likely to catch fire?* Disponible en <https://money.cnn.com/2018/05/17/news/companies/electric-car-fire-risk/index.html>

CORDIS. (2020). *Automated e-buses lithium ion battery early warning and fire suppression*

system. Disponible en Community Research and Development Information Service: <https://cordis.europa.eu/article/id/413392-pioneering-system-to-greatly-reduce-risk-of-fire-in-electric-buses>

ElectroMOV (2020). *Montevideo incorpora 30 buses eléctricos a su flota de transporte público*. Disponible en <http://www.electromov.cl/2020/05/18/montevideo-incorpora-30-buses-electricos-a-su-flota-de-transporte-publico/>

Encuestas IT en la web (s. f.). *Sueldos de ingeniería técnico en Argentina 2020*. Disponible en <https://www.encuestasit.com/sueldos-ingenier%C3%ADAt%C3%A9cnico-2020>

Gao, Z., Lin, Z., La Clair, T., Liu, C. Li, J.-M. Birky, A. y Ward, J. (2017). *Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service*. Energy 122 (2017) 588-600.

Laib, F., Braun, A. y Rid, W. (2019). *Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany*. Transportation Research Procedia.

Lithium Ion Battery Test Centre (2020). *Public report 8 - Lithium-ion battery testing*, Abril de 2020. Disponible en <https://batterytestcentre.com.au/wp-content/uploads/2020/05/Battery-Testing-Report-8-April-2020.pdf>.

McKinsey (2019). *Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage*. Disponible en <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage>

MIEM, UTE y BYD. (2013). *Pruebas de campo bus 100 % eléctrico*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Industria, Energía y Minería; Intendencia de

Montevideo; Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas; BYD.

Moore, D. S. (2013). *The basic practice of statistics*. New York: W. H. Freeman and Company.

OMS (2018). *Environmental noise guidelines for the European region*. Organización Mundial de la Salud.

Ricardo-AEA (2014). Update of the handbook on external costs of transport. Londres. Disponible en https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/handbook_on_external_costs_of_transport_2014_0.pdf.

SAE International (2002). *Electric vehicle energy consumption and range test procedure*.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015). *Tercera comunicación nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

Sun, P., Bisschop, R., Niu, H. y Huang, X. (2020). *A review of battery fires in electric vehicles*. Fire Technology.

Tesla (2016). *Emergency response guide*. Disponible en https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/first_responders/2016_Models_S_Emergency_Responders_Guide_en.pdf

Trees.org for the future (s. f.). *Forest garden carbon brief*. Disponible en <https://trees.org/app/uploads/2020/04/TREES-Carbon-Brief.pdf>

UNCTAD (2020). *Commodities at a glance; Special issue on strategic battery raw materials*. Conferencia de las Naciones sobre Comercio y Desarrollo.

Volkswagen (2020). *Seven big misconceptions - E-car fact check*. Disponible en <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2020/03/seven-big-misconceptions-e-car-fact-check.html#>

Volvo (2016). *Electric buses and noise*. Disponible en http://www.bullernatverket.se/wp-content/uploads/2014/05/Electric-buses-and-noise_Volvo-Bus.pdf

Yu, Q., Tiezhu, L. y Hu, L. (2016). *Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving*. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915012222?via%3Dihub>

Anexo

Parámetros de la planilla Excel para evaluación de factibilidad económica

Evaluación	
Periodo	Años
Tasa de descuento	%
Operación	
Operación año (eléctrico y diésel)	Km
Consumo bus eléctrico	KWh/Km
Consumo bus diésel	litros/Km
Inversión	
Precio bus eléctrico aduana	USD
Precio cargador aduana	USD
Reacondicionamiento bus eléctrico	USD
Precio paquete baterías aduana	USD
Valor infraestructura eléctrica	USD
Precio bus convencional	USD
Consumo bus eléctrico	
Costo fijo electricidad anual	USD
Costo KWh	USD
Consumo bus diésel	
Costo diésel	USD por litro
Mantenimiento	
Mantenimiento bus eléctrico	USD/Km
Mantenimiento cargador	USD por año
Mantenimiento bus diésel	USD/Km
Otros costos variables	
Lubricantes bus eléctrico	USD/Km
Lubricantes bus diésel	USD/Km
Cambio moneda	
Pesos Arg por USD	USD
Costos financieros	

Tasa crédito anual bus eléctrico	%
Tasa crédito anual bus diésel	%
Periodo crédito (años)	Años
Flota	
Nº de buses	Nº
Cargadores	Nº
Impuestos bus eléctrico	
Subsidio a la compra	%
Impuesto importación bus eléctrico	%
IVA bus eléctrico	%
Impuestos cargador	
Subsidio a la compra	%
Impuesto importación cargadores	%
IVA cargador	%
Impuestos paquete de baterías	
Subsidio a la compra	%
Impuesto importación paquete de baterías	%
IVA paquete de baterías	%
Valor residual paquete de baterías	
Porcentaje de valor de compra (USD por KWh)	USD
Disminución de valor paquete de baterías en 8 años	%
Capacidad de la batería (KWh)	Nº
Disminución de capacidad paquete de baterías en 8 años	%
Impuestos buses	
IVA buses	%
Venta bus diésel	
De 8 años. Porcentaje de valor de bus diésel nuevo	%
De 3 años. Porcentaje de valor de bus diésel nuevo	%
Valor residual bus eléctrico	
Porcentaje de valor de compra	%
Energía eléctrica	
IVA	%
Subsidio	%
Incremento anual precio electricidad	%
Porcentaje adicional por pérdida del sistema	%

Media tensión (disminución c/r a BT)	%
Alta tensión (Disminución c/r a AT)	%
Valor personal adicional (HH) media y alta tensión	USD
Combustible diésel	
Valor litro (ARS)	ARS
IVA	%
Subsidio	%
Incremento anual precio diésel	%
Factor de deterioro batería	
Por año	%
Factor de deterioro mantenimiento por año	
Bus eléctrico	%
Bus diésel	%

