



Costo total de propiedad: Buses eléctricos en el nuevo modelo de negocios del transporte público de Santiago de Chile



SOCIO DE APOYO



AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES





ZEBRA (*Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator*) es una asociación enfocada en generar y documentar experiencias para acelerar el despliegue de autobuses cero emisiones en las ciudades de América Latina. Tiene los objetivos de alcanzar las metas climáticas globales, así como mejorar la calidad del aire urbano y el estándar general del transporte público. ZEBRA es financiada por P4G (*Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030*), liderada por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por su sigla en inglés) y C40 Cities, y apoyada por Centro Mario Molina Chile (CMM) y *World Resources Institute* (WRI, por su sigla en inglés).

Este reporte fue elaborado por Lourdes Becerra, con apoyo de Sebastián Galarza del CMM, y revisado por Oscar Delgado y Carlos Bueno del ICCT.

La revisión de estilo fue elaborada por Jorge Gordillo Matalí.

Se agradece especialmente a Thomas Maltese y Mariana Batista de C40 por el apoyo para coordinar el proyecto y gestionar la información utilizada. Igualmente se agradece a Diego Cuq, practicante colaborador en la sistematización de información, así como a Andrés Barentín de Dhemax Ingenieros y a las empresas operadoras que cooperaron con la validación y provisión de datos.



TABLA DE CONTENIDOS

1	Introducción y objetivos	1
2	Antecedentes	2
3	Metodología e información	5
3.1	Costo total de propiedad	5
3.2	Costos de capital	8
3.3	Costos de operación	10
3.4	Costos de mantenimiento	10
3.5	Costos por revisión de vida media y recambio de baterías	12
3.6	Seguros	12
4	Resultados	14
4.1	Escenario base o de licitación	14
4.2	Escenarios para evaluar la sensibilidad de los resultados	19
5	Análisis de resultados	25
6	Conclusiones	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Unidades de Negocio para la operación de Transantiago, 2019	2
Tabla 2.	Características de los buses evaluados	6
Tabla 3.	Características de los servicios o rutas analizadas en el presente	7
Tabla 4.	Información utilizada para introducir al modelo de Costo Total de Propiedad [\$USD]	13
Tabla 5.	Órdenes de magnitud del Costo Total de Propiedad para cada servicio y por kilómetro [\$USD]	15
Tabla 6.	Desglose de Costos Totales de Propiedad, promedio para todos los servicios [\$USD]	16
Tabla 7.	Desglose de Costos Totales de Propiedad por kilómetro, promedio para todos los servicios [\$USD]	18
Tabla 8.	Escenarios de sensibilidad analizados	19
Tabla 9.	Distribución de la responsabilidad del TCO del Red Metropolitano	26
Tabla 10.	TCO por kilómetro según la entidad responsable de incurrir en el costo	27
Tabla 11.	TCO por kilómetro para cada ruta evaluada, ordenadas de menor a mayor TCO	28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Cambio en el modelo de negocio.	3
Ilustración 2. Metodología de Costo Total de Propiedad, parámetros a comparar.	5
Ilustración 3. Conclusiones de la presente evaluación del TCO bajo las condiciones de licitación.	32
Ilustración 4. Principales recomendaciones de la presente evaluación.	33

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comparación del Costo Total de Propiedad para cada servicio por kilómetro (\$USD). Promedio de los buses diésel versus el promedio de los buses eléctricos.	16
Gráfico 2. Desglose de Costos Totales de Propiedad en porcentaje, promedio por tecnología de bus para todos los servicios [\$USD].	19
Gráfico 3. Desglose de Costos Totales de Propiedad por kilómetro, promedio para todos los servicios. Escenario de contrato de concesión de 14 años [\$USD].	21
Gráfico 4. TCO por kilómetro promedio para todos los servicios, considerando variaciones en los costos de mantenimiento [\$USD].	23
Gráfico 5. TCO por kilómetro promedio para todos los servicios, escenario de volatilidad del diésel [\$USD].	24
Gráfico 6. Síntesis de la distribución porcentual de la responsabilidad en la partida de costos del TCO entre Operador-Suministrador del Red Metropolitana de Santiago.	27
Gráfico 7. TCO por kilómetro promedio de todas las rutas para cada escenario evaluado [\$USD/ km].	29

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

A la fecha de elaboración del presente informe, el Sistema de Transporte Público de Santiago de Chile (RED Metropolitana de Movilidad, antes Transantiago -de 2012 a 2019-) está integrado por seis Unidades de Negocio (ver Tabla 1) y concesionarios de uso de vías, que en conjunto operan 379 servicios o rutas con una flota aproximada de 6981 buses (DTPM, 2020)¹. A partir de 2019, el sistema comenzó un proceso de reconfiguración, separando la provisión de la operación de flota con la finalidad de incorporar tecnología más eficiente, reducir las unidades de negocio², fomentar la competencia del sistema y mejorar la calidad del servicio.

Sin embargo, para renovar buses del sistema en el modelo original, desde 2016 en adelante, se suscribieron contratos de arriendo con opción de compra (conocidos como leasing y llamados de manera local “contratos de provisión”) entre el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) y el suministrador de flota. En este caso, si el operador en curso deja de prestar servicios, se permite la cesión de derechos de dichos contratos de leasing para que puedan traspasarse a uno nuevo. Para facilitar esta operación, los buses son declarados bienes afectos del sistema, forzando así que se mantengan en operación por toda la duración del contrato de leasing, que coincide con la vida útil del bus. Es en este contexto que el presente estudio busca transparentar los costos totales de propiedad (TCO, Total Cost of Ownership, por sus siglas en inglés) asociados a estos contratos suscritos para la provisión de buses urbanos diésel y eléctricos. El estudio se basa en solicitudes de información al MTT por el Portal de Transparencia y presenta una metodología para estimar los TCO de distintas tecnologías vehiculares con la finalidad de resaltar las variables que más influyen en los costos de una concesión de buses diésel o de buses eléctricos. Finalmente, a través de este análisis, resaltamos algunos de los aspectos claves que deben ser considerados en futuros contratos de concesión y/o licitación de suministro de flota.

1 Informe de Gestión 2020. <https://www.dtpm.cl/descargas/memoria/informe%20de%20gestion%202020.pdf>.

2 Anteriormente se contaba con una Unidad de Negocio adicional, la cual sufrió modificaciones y sus servicios fueron repartidos entre las otras unidades.

2 ANTECEDENTES

En términos prácticos, el modelo de concesión fue modificado ya que previamente los operadores de transporte debían asumir la responsabilidad de suministro de la flota y de su operación, es decir: (i) disponer de los buses y terminales, (ii) cumplir con los servicios exigidos en el programa de operación acordado con la autoridad reguladora y (iii) dar mantenimiento a través de un plan anual. Este modelo que proporcionaba gran responsabilidad al operador llevó a diversos fallos que pusieron al sistema bajo estrés operacional. Así mismo, según las reglas del proceso de licitación del antes llamado Transantiago, el estado tenía facultad para cancelar contratos si no se cumplía con el estándar del servicio, pero dada la propiedad de los activos por parte de los operadores, esto pondría al sistema en una situación problemática. Es por esta, entre otras razones, que renovar la flota y transitar hacia la electromovilidad necesitaba una modificación contractual que permitiera cambiar el modelo de negocio al hacer posible un modelo de leasing, al mismo tiempo incorporando la tecnología eléctrica y posibilitando intervenciones en las terminales³⁴.

Tabla 1. Unidades de Negocio para la operación de Transantiago, 2019.

Empresas concesionarias de uso de vías, año 2019	Porcentaje de flota
U1* - Inversiones Alsacia S.A.	-
U2 - Subus Chile S.A.	19,7 %
U3 - Buses Vule S.A.	20,1 %
U4 - Express de Santiago Uno S.A.	22,2 %
U5 - Buses Metropolitana S.A.	18,4 %
U6 - Redbus Urbano S.A.	10,9 %
U7 - Servicio de Transporte de Personas Santiago S.A.	8,7 %

*La flota de la unidad de negocio 1 fue repartida en el resto de unidades⁴.

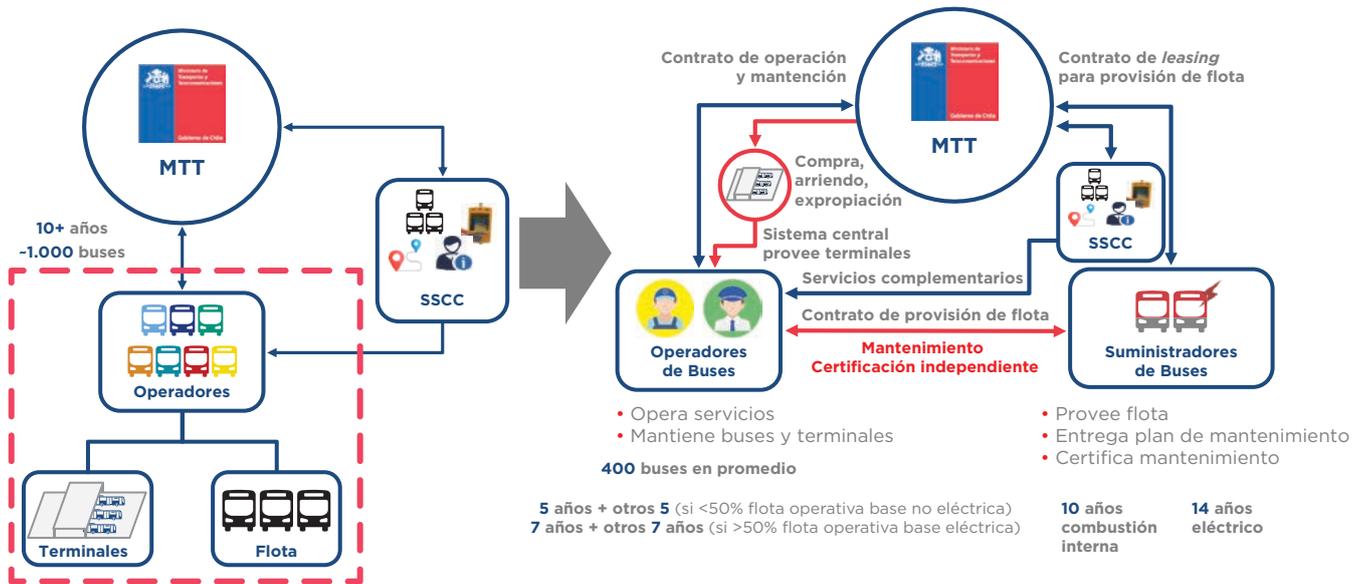
Fuente: Informe de gestión 2019, DTPM 2021.

Como ya se ha mencionado, desde 2016 en adelante, se suscribieron contratos de arriendo con opción de compra (leasing o contratos de provisión) entre el MTT y el suministrador de flota. En este caso, si el operador en curso deja de prestar servicios, se permite la cesión de derechos de dichos contratos de leasing para traspasarse y no interrumpir la operación de los buses durante su vida útil.

³ Hurtubia y Leonhardt. *The Experience of Reforming Bus Concessions in Santiago de Chile*. 2021. OECD.

⁴ Desde 2014 Alsacia se declaró en quiebra y comenzó un proceso de reestructuración que diluyó sus operaciones en la ciudad. Ver, por ejemplo: <https://www.elmostrador.cl/mercados/2014/10/16/alsacia-cumple-lo-prometido-mayor-operador-del-transantiago-declara-quiebra-protégida-en-ee-uu/>

CAMBIO DEL MODELO DE NEGOCIO



- Unidades integrales, operadores controlan variables estratégicas
- Requerimientos financieros limitan la competencia
- Duración de los contratos determinada por vida útil de los buses
- Dinámica de contratos no consistente con dinámica urbana

- Unidades de menor tamaño y contratos de menor plazo
- Sistema central controla los activos estratégicos (buses y terminales)
- Agrega flexibilidad para reemplazo por mal desempeño

Ilustración 1. Cambio en el modelo de negocio.

Fuente: Tomado de Presentación para el Senado, DTPM, Octubre 2020.

El Directorio de Transporte Público Metropolitano de Santiago (DTPM) lanzó en 2019 las bases de licitación pública para la prestación del servicio complementario de suministro de buses, las cuales además de contar con el modelo de leasing, incluye un incentivo a la compra de más unidades eléctricas para la provincia de Santiago y las comunas de San Bernardo y Puente Alto. De forma complementaria, el DTPM desarrolló las bases de licitación pública para la concesión de uso de vías (operación de los servicios) e hizo un segundo llamado para seis nuevas Unidades de Servicio (ver tabla 1). En esta nueva licitación, dentro de su oferta, los operadores deben considerar y elegir entre los buses ganadores de la prestación del servicio complementario de suministro de buses, así como definir la cantidad de buses a utilizar.

Los cambios más importantes en los nuevos contratos de concesión de vías del MTT con los operadores son los de duración y nuevas tecnologías. Ahora, aquellos contratos cuya operación implique una flota compuesta de más de 50 % de buses de propulsión a diésel, tendrán contratos de operación de 5 años, con posibilidad a extensión de otros 5. Mientras que los contratos donde más del 50 % de la flota esté compuesta por buses eléctricos, tendrán 7 años

de duración, con una posible extensión por 7 años más. En promedio, cada Unidad de Servicio contará con cerca de 400 buses en operación. Bajo el nuevo diseño del sistema, el MTT debe pagar al suministrador una cuota de flota [UF⁵/bus/mes] y al operador un pago mixto por pasajero transportado y un costo por kilómetro, que depende de la tecnología del bus. A su vez, el operador debe pagar un certificado de mantenimiento al suministrador [UF/bus/mes].

La licitación pública del suministro de buses de transporte público lanzada en 2019 ha generado amplias expectativas que deben ser analizadas. La incorporación de tecnología eléctrica al sistema RED, aunado al cambio en el modelo de negocio, ha generado dudas sobre la rentabilidad y viabilidad del servicio a largo plazo, a pesar de que este nuevo modelo permite la inclusión de nuevos actores, como operadores que no cuentan con la capacidad crediticia y/o el capital que se requiere para la compra de los activos (buses). Las bases fueron compradas por 49 adquirientes que formaron consorcios y asociaciones, cuyo resultado fue la presentación de 23 ofertas, que en conjunto abarcan 5 de los 12 lotes⁶ licitados. Con la licitación para el suministro de buses se esperaba renovar un máximo de 2030 buses. Por otro lado, con la licitación de operación, las 6 Unidades de Servicios serán más pequeñas que las actuales Unidades de Negocios, con un tamaño de flota de alrededor de 400 buses.

5 Unidad de Fomento. Definida como "índice de reajustabilidad estimado de acuerdo con la variación experimentada por el Índice de Precios al Consumidor (IPC), calculado y autorizado por el Banco Central de Chile (Banco), para las operaciones de crédito de dinero en moneda nacional que efectúen las empresas bancarias y las cooperativas de ahorro y crédito". Banco Central de Chile. <https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/Metodologias/EMF/UF.pdf>.

6 Un lote equivale a una combinación de tecnología (i.e. diésel, eléctrico, gas u otro) y tipología del bus (A, B2, C2).

3 METODOLOGÍA E INFORMACIÓN

3.1 COSTO TOTAL DE PROPIEDAD

El TCO es una herramienta metodológica que evalúa los costos totales influidos por el uso de un equipo tecnológico durante todo el periodo de propiedad. La evaluación de un TCO abarca desde la adquisición del activo, su operación y mantenimiento, hasta cualquier otro gasto incurrido que se desee considerar según las condiciones de la evaluación. Para lograr esto, hemos reconstruido un escenario base enmarcado por las recientes licitaciones de suministro y operación de la RED Metropolitana de Movilidad, e investigado la magnitud del impacto en los costos por el cambio del modelo de negocios del sistema. Para ello, se estudiaron las tecnologías de buses ofertadas, las características de las licitaciones y las condiciones de operación, puesto que los aspectos técnicos determinan en su mayoría la estructura de costos.

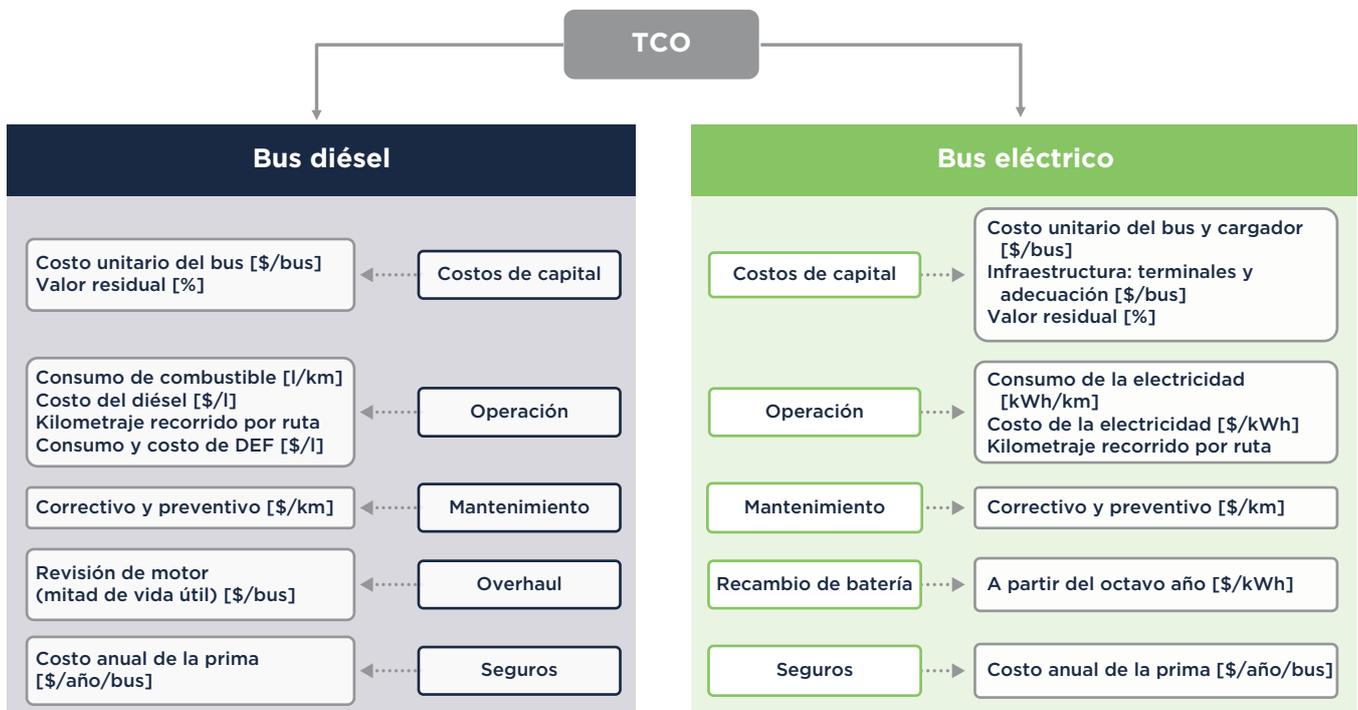


Ilustración 2. Metodología de Costo Total de Propiedad, parámetros a comparar.

Fuente: elaboración propia.

El TCO es una metodología que permite comparar los costos de distintas tecnologías operando los mismos servicios. En este caso, se eligieron 15 rutas o servicios del Sistema de Transporte Público de Santiago representativas de las rutas/servicios licitados y se comparan 2 buses diésel versus 4

eléctricos a batería, todos tipo B2 según la clasificación del Decreto Supremo D.S.122/1991. Estos buses fueron incorporados al sistema de transporte de Santiago bajo la figura de contratos de provisión. Como los oferentes de las bases de licitación de uso de vías (N° LP CUV001/2019) solo pueden elegir buses entre aquellos que cuenten con un Contrato de Suministro con el Ministerio, el escenario de comparación se realizará considerando las condiciones contractuales de las bases de licitación del uso de vías y no necesariamente la de los contratos de provisión.

A continuación (ver Tabla 2) se muestra un resumen de las especificaciones técnicas y rendimiento operacional de los buses evaluados, relacionadas con el rendimiento operacional.

Tabla 2. Características de los buses evaluados.

Información del bus	Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4
Norma de emisión	Euro VI	Euro VI	-	-	-	-
Consumo de combustible [km/l]	1,39	1,55	-	-	-	-
Consumo de energía (kWh/km)	-	-	1,57	1,63	1,48	1,74
Consumo de energía [Mj/km]	27,45	24,70	5,65	6,01	5,33	6,26
Potencia del motor [kW]	220	206	300	350	215	280
Capacidad de pasajeros	95	99	81	90	87	87
Capacidad de la batería [kWh]	-	-	276,5	385	324	375
Potencia [kW] y tipo de carga	-	-	80 (AC)	150 (DC)	150 (DC)	150 (DC)
Autonomía [km]	-	-	176	237	220	215

Nota: Los números de consumo de energía y combustible, al igual que la autonomía de los buses eléctricos, corresponden a mediciones realizadas bajo el ciclo de conducción "Ciclo TS-STGO"⁷.

Fuente: Elaboración propia con datos del 3CV (consultado en agosto de 2021).

Igualmente, en las rutas consideradas se recorre una suma promedio de 79 mil kilómetros anuales, realizados entre toda la flota del servicio. Así mismo, las rutas cuentan con alrededor de 26 buses promedio. Los kilómetros al año incluyen los días laborales, sábados y domingos. Se garantizó la representatividad en los servicios y en las diferentes cantidades de buses, en el kilometraje distinto y en las diferentes Unidades de Negocio.

⁷ Resolución Exenta N° 2.243 "Protocolo Técnico para Obtener Consumo Energético en Buses de Transporte Público Urbano de la Ciudad de Santiago". <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1121384>.

Tabla 3. Características de los servicios o rutas analizadas en el presente.

Unidad de Negocio	Servicio o ruta	km-año-buses	Número de buses
7	1	72 453	36
7	2	60 918	41
5	3	79 039	33
5	4	102 116	21
2	5	80 191	7
2	6	109 542	21
2	7	61 683	33
2	8	86 004	25
2	9	43 957	21
2	10	57 992	18
6	11	99 139	23
6	12	75 628	42
6	13	106 035	30
7	14	62 944	17
7	15	100 353	21

Fuente: Dirección de Transporte Público Metropolitano, 2021. Solicitud vía el Portal de Transparencia.

El TCO es una metodología comparativa, por lo tanto, generalmente deben utilizarse las mismas características de todas las tecnologías que se desee contrastar. No obstante, aquí el principal escenario base o de licitación considera un periodo de operación de 10 años para los vehículos a diésel y 14 años para los vehículos eléctricos, por lo que en estricto rigor no son comparables, sin embargo más adelante se analiza el mismo escenario de temporalidad de 14 años para los vehículos a diésel. Dicho lo anterior, se resalta que la presente evaluación simula las condiciones de la reciente licitación llevada a cabo por la DTPM y se basa en el conocimiento del nivel de costos asociados al nuevo modelo de negocio y la contratación del servicio.

Como se menciona previamente, la licitación para la concesión del uso de vías indica una duración de contrato de 5 años cuando más de 50 % de la flota está compuesta de buses a diésel, con una posible extensión de hasta 10 años en total. Por otro lado, cuando la flota está compuesta por más de un 50 % de buses eléctricos la duración es de 7 años con posible extensión de hasta 14 años en total. Los contratos de suministro de buses son siempre de 10 años para los diésel y 14 años para los eléctricos. El fundamento detrás de tener contratos de operación con temporalidades distintas tiene su origen en la tecnología, puesto que los buses eléctricos tienen menos componentes

móviles, menos vibración y piezas del tren motriz de mayor duración (el motor eléctrico tiene una vida útil mayor a la del motor diésel), por lo que es posible extender su vida útil operando en buenas condiciones, siempre que el estado de la batería lo permita⁸; además, son activos más costosos, por lo que se benefician de una mayor intensidad de uso para amortizar la inversión.

A continuación se presenta una descripción del abordaje de costos de cada parámetro considerado, cuyo objetivo es dar a conocer los supuestos y enmarcar los resultados de la evaluación.

3.2 COSTOS DE CAPITAL

En los costos de capital de los buses a diésel solo se considera el precio de compra del bus, sin embargo, en los eléctricos adicionalmente se asume el costo de la adecuación de la infraestructura en los terminales y el costo de los cargadores.

Los costos unitarios de los buses fueron extraídos de los contratos de provisión, solicitados mediante el Portal de Transparencia del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile⁹. Se evaluaron cuatro tecnologías eléctricas con distintas capacidades de batería y dos buses convencionales a diésel. Vale la pena señalar que los mencionados contratos de provisión fueron firmados en 2019 y 2020, por lo que los precios de los buses corresponden al valor comercial de esos años. El valor residual asumido se determinó a través de un sondeo con operadores y autoridades, quienes han reportado que el valor residual depende en gran medida del nivel de degradación del bus al término de su vida útil. En el presente estudio se asumió 10 % del costo de compra del bus (independiente de la tecnología) y se considera una depreciación lineal¹⁰. Es posible que el valor residual de un bus eléctrico sea más elevado, ya que la batería puede ser reestructurada químicamente y reutilizada con una segunda vida, sin embargo, ninguno de los buses eléctricos en circulación en Santiago ha terminado su vida útil, por lo que se desconoce concretamente el valor residual de este tipo de tecnología en sus distintas aplicaciones. Es importante mencionar que el MTT no se beneficia del valor residual del bus. Este valor final del activo queda a favor del financista o

⁸ El contrato de suministro garantiza el estado de salud de la batería.

⁹ <https://www.portaltransparencia.cl/PortalPdT/directorio-de-organismos-regulados/?org=AN001>.

¹⁰ Generalmente la depreciación de los vehículos pesados es multivariable y los eléctricos se deprecian con mayor velocidad que los vehículos convencionales. Argonne. 2021. *Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains*. <https://publications.anl.gov/anlpubs/2021/05/167399.pdf>

del fabricante, ya que en todos los casos se solicita obligatoriamente una disposición final correcta del bus.

En cuanto a la infraestructura de recarga, la estimación de costos se centró en una estrategia de recarga en terminal. Los costos dependen del tamaño de este, del número de buses y de la estrategia de carga implementada. Los costos de adecuación no crecen linealmente con la flota eléctrica, sino que una vez resuelta la línea de tensión, la potencia necesaria y sus componentes, el resto de las adecuaciones corresponden a la habilitación de tableros y tendido eléctrico, por lo que puede extrapolarse hasta cierto número de cargadores mientras la potencia de recarga no se vea comprometida. El presente estudio supuso que las terminales ya cuentan con una línea de media tensión y los componentes directamente asociados, así que solo para estimar el costo de adecuación por bus, se asumió una flota de 20 buses y que cada cargador tiene 2 puntos de carga. Únicamente se consideraron los costos asociados a la adecuación del terminal, en específico la habilitación de los tableros, tendido eléctrico y puesta en marcha, con un total de USD \$2.865 por bus. Este costo no incluye el cargador ni el aumento de potencia eléctrica o de la red. El primero se considera como un costo aparte y el segundo es responsabilidad de la empresa distribuidora de energía. Se señala que en Chile los terminales son propiedad de la autoridad, pero los operadores son responsables de todas las adecuaciones que se tengan que realizar al interior de estos para operarlos correctamente, y por legislación en Chile, el costo de adecuación de la red desde el terminal a la subestación eléctrica lo cubre la distribuidora. Estos últimos costos ya están implícitos en los contratos de provisión de energía, no lo asume directamente la autoridad, ni tampoco el operador, y por ende quedan fuera del alcance de este estudio.

En operaciones anteriores, el número de cargadores asignados por bus era de 2 en promedio. Conforme los operadores se han familiarizado con la tecnología, se han podido mejorar las estrategias de carga y optimizar el número de cargadores requeridos por bus. Expertos concedores de la operación del sistema RED han señalado que, bajo una buena gestión, el número promedio de buses por cargador es de 3,75, semejante a los resultados obtenidos en la más reciente licitación, y por lo tanto, asumido de esta forma en el presente estudio¹¹. De continuar con la configuración inicial (2 cargadores por bus), el costo de infraestructura por bus podría aumentar

¹¹ Cabe resaltar que en general este ratio esta asociado a cargadores con una potencia de 150kWh con dos mangueras de conexión.

aproximadamente un 46 %, debido a que se requerirían más cargadores para satisfacer la misma demanda de buses.

3.3 COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación equivalen al consumo de energía, derivado del kilometraje, al rendimiento energético del bus, y en el caso de los buses diésel, al costo del combustible y del líquido de escape (DEF, por sus siglas en inglés), todo ello necesario para el funcionamiento del sistema de reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés)¹².

Primeramente, para la evaluación del rendimiento energético, se utilizaron los resultados de consumo/eficiencia energética publicados por MTT, que fueron obtenidos dentro del proceso de homologación del bus mediante la Resolución Exenta N° 2243, “Protocolo Técnico para Obtener Consumo Energético en Buses de Transporte Público Urbano de la Ciudad de Santiago”. Al respecto, debe señalarse que dicha resolución evalúa el rendimiento de los buses con base en un ciclo de conducción estándar diseñado para el Transantiago, mismo que es relativamente exigente en términos de consumo energético, por lo cual en la práctica podría ser mejor al arrojado en los test de laboratorio.

El costo del diésel utilizado es un promedio de las proyecciones de los precios de paridad realizadas por la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) en los últimos 5 años. Estas estimaciones consideran una cobertura de riesgo por el tipo de cambio y por las fluctuaciones internacionales en el precio internacional del petróleo. Los precios de paridad de ENAP, en dólares, varían con el del Brent, que es el principal indicador para el precio del petróleo crudo en el país.

El costo de la electricidad utilizado en el escenario base (USD \$0,046), es el reportado en uno de los contratos de suministro. Se señala que solo uno de los cuatro contratos revisados contenía explícitamente este dato. Cabe resaltar que la energía para toda la operación de buses eléctricos del sistema de transporte público de Santiago tiene certificación de proveniencia de fuentes renovables.

¹² También llamado *AUS 32* o *Adblue*, por su nombre comercial, es un líquido utilizado en los buses a diésel equipados con reducción catalítica selectiva (principalmente las tecnologías más nuevas, Euro VI). Se utiliza para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno del escape del motor.

3.4 COSTOS DE MANTENIMIENTO

En el modelo de negocios actual, el costo de mantenimiento es el parámetro que cuenta con mayor incertidumbre de información. Esto se debe principalmente a que es un costo compartido entre varios actores y que en los contratos asociados no se explicita rigurosamente qué se incluye. Por un lado, el mantenimiento preventivo de buses y terminales es responsabilidad del operador, costo que está afianzado en el contrato de concesión de vías. Según pláticas con operadores, el mantenimiento correctivo está relacionado con vandalismo, accidentes e imprevistos no considerados y está asociado tanto a las garantías como al seguro de los buses, pero sigue siendo responsabilidad del operador. Por el contrario, el suministrador provee el Plan de Mantenimiento y realiza la certificación de su cumplimiento con el fin de hacer válidas las garantías cuando corresponda. Este costo está afianzado a través del contrato de provisión.

En este sentido, los contratos de concesión no cuentan con un desglose que clarifique lo que se incluye en la cuota fijada por kilómetro, y por lo tanto, se desconoce qué porcentaje de esta corresponde al mantenimiento. En los contratos de provisión el costo de certificación está asociado al número de técnicos en terreno y la frecuencia varía por marca, adoptando distintos indicadores, como el kilometraje o bien, parámetros asociados a la gestión de flota. La literatura señala que se recomienda el mantenimiento preventivo solo dos veces cada 77 250 km¹³. En el presente estudio se hace distinción del costo del mantenimiento preventivo y correctivo, y en ninguno de los casos se incluye el costo de los repuestos.

Los buses eléctricos poseen menos partes móviles, lo que significa que requieren menos mantenimiento mecánico regular que un autobús convencional diésel. Un bus eléctrico no requiere cambios de aceite porque no utiliza combustible, tampoco requiere cambio de filtro porque no existen emisiones del tubo de escape; únicamente requieren recargas de líquido de transmisión y refrigerante del motor⁴. Los Operadores deben seguir el Plan de Mantenimiento proporcionado por el Suministrador y éste último certifica que este ha sido llevado a cabo correctamente para que las garantías sean válidas.

Dicho lo anterior, para los buses eléctricos se estimaron costos de mantenimiento de USD \$0,08/km para el preventivo y de USD \$0,14/km del correctivo. En el caso de los buses diésel, se estimó un costo de USD

¹³ Aamodt, Cory, Coney. *Electrifying transit: a guidebook for implementing battery electric buses*. 2021. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>.

\$0,12/km para el mantenimiento preventivo y USD \$0,19/km para el correctivo. Estos costos incluyen chasis, carrocería y mano de obra, surgen de una mezcla de revisar los contratos de provisión, además de discusiones con expertos, operadores y fabricantes. Se resalta que en este caso el mantenimiento correctivo es más económico en los buses eléctricos que en los diésel, pero puede que esto no sea siempre así. En la tecnología eléctrica los componentes y/o repuestos pueden ser más costosos y por lo tanto, es posible que el mantenimiento correctivo sea más elevado que el reportado. No se consideraron costos asociados al mantenimiento del terminal ni de los cargadores debido a que no se contó con datos suficientes para sustentar¹⁴.

3.5 COSTOS POR REVISIÓN DE VIDA MEDIA Y RECAMBIO DE BATERÍAS

Se asumió un costo por la revisión de vida media u overhaul de los buses. En el caso de los diésel este fue asignado al sexto año, cuando los buses han completado sus primeros cinco años de operación y el operador acaba o renueva su contrato de concesión de vías; se hace referencia a una renovación del motor con un costo correspondiente a 15 % del valor comercial del primer año del bus. En el caso de los buses eléctricos se asumió 2 % con respecto al valor total del bus igualmente del primer año para componentes del tren motriz, pero no para el recambio de baterías, lo que tuvo el objetivo de considerar contingencias que puedan darse durante la revisión de vida media o debido al recambio de baterías. Es relevante recordar que los buses eléctricos aún no cumplen los años de operación asignados en el contrato de concesión, sin embargo, el riesgo tecnológico recae sobre el suministrador de flota, de acuerdo con las bases.

Adicionalmente, para los buses eléctricos se supuso un costo por el recambio de batería a partir del año número 8, cuando han completado sus primeros 7 años de operación y el operador acaba o renueva su contrato de concesión de vías. Para su estimación se utilizó una proyección que considera que el precio de las baterías se sitúa alrededor de los USD \$65/kWh al año 2030¹⁵. Como base del cálculo se consideró una batería de 385 kWh, la cual sobrepasa la capacidad de las que actualmente operan en Santiago. Se espera que con ello pueda cubrirse cualquier situación que puede darse en un futuro, como la necesidad del aumento de autonomía o a causa de la incertidumbre en los precios del litio, entre otros factores.

¹⁴ Uno de los contratos exhibe una cotización con costos anuales de mantenimiento por cargador. Esta es de alrededor de USD \$2 000 y de USD \$7 000 para los accesorios del terminal. Sin embargo, dado los costos conocidos del cargador, la cotización se consideró elevada y por falta de validación se decidió dejar fuera este costo.

¹⁵ <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.

3.6 SEGUROS

Se estima que la cuota del seguro anual corresponde al 1,5 % del valor comercial del bus. Este último se estimó con base en la depreciación anual del bus considerada (10 %). Los gastos que no dependen del tipo de tecnología fueron dejados fuera del análisis. Por ejemplo, los costos asociados a las horas-hombre del conductor del bus y personal administrativo; además de costos por imposiciones gubernamentales o permisos de circulación.

Tabla 4. Información utilizada para introducir al modelo de Costo Total de Propiedad.

Parámetro	Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4	Fuente de la información	
Costos de capital								
Costo del bus [USD]	\$208 650	\$202 085	\$433 931	\$460 160	\$404 600	\$346 730	Contratos de provisión de flota	
Capacidad batería [kW]	-	-	385	385	324	374	Contratos de provisión de flota	
Costo del cargador DC [USD]	-	-	\$24 000	\$24 000	\$24 000	\$92 000*	Cotizaciones privadas / Contratos de provisión de flota	
Costo adecuación de la infraestructura por bus [USD]	-	-	\$2 865	\$2 865	\$2 865	\$2 865	Estimaciones propias, no incluye adaptación de la red, sólo cableados, tendido, obra civil y puesta en marcha	
Buses por cargador	-	-	3,75	3,75	3,75	3,75	Requerimiento licitación	
Costos de operación y mantenimiento								
Eficiencia del bus [diésel l/km - eléctrico kWh/km]	0,72	0,65	1,57	1,67	1,48	1,74	3CV. MTT. Resultados de Medición Según Resolución Exenta N° 2.243 Protocolo Técnico para Obtener Consumo Energético en Buses de Transporte Público Urbano de la Ciudad de Santiago	
Costo del combustible [diésel USD/l - electricidad USD/kWh]	\$0,82	\$0,82	\$0,046	\$0,046	\$0,046	\$0,046		
Costo de aditivo [diésel exhaust fluid, DEF] [USD/l]	\$0,63	\$0,63	-	-	-	-	Cost-Benefit Analysis of Mexico's Heavy-duty Emission Standards (NOM 044)" ICCT 2014	
Consumo de DEF AdBlue [% por l de diésel]	5 %	5 %	-	-	-	-		
Costos de mantenimiento preventivo [USD/km]	Alto	\$0,14	\$0,14	\$0,09	\$0,09	\$0,09	\$0,09	Estimación propia con información de contratos de provisión y criterio de expertos
	Medio	\$0,12	\$0,12	\$0,08	\$0,08	\$0,08	\$0,08	
	Bajo	\$0,11	\$0,11	\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,06	
Costos de mantenimiento correctivo [USD/km]	Alto	\$0,20	\$0,20	\$0,16	\$0,16	\$0,16	\$0,16	
	Medio	\$0,19	\$0,19	\$0,14	\$0,14	\$0,14	\$0,14	
	Bajo	\$0,17	\$0,17	\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,13	
Revisión de vida media motor (Overhaul) [USD]		\$31 298	\$30 313	\$8 679	\$9 203	\$8 092	\$6 935	Supuesto CMM/DTPM: bases licitación exige asumir costo de vida media
	% del valor bus	15 %	15 %	2 %	2 %	2 %	2 %	
Recambio de baterías [USD]	0 %	0 %	\$25 025	\$25 025	\$21 060	\$24 310	Se asume un costo al 2030 de USD\$65/kWh. BloombergNEF.	
Seguros [USD/año/bus]	\$4 771	\$4 684	\$8 162	\$8 556	\$7 722	\$6 854	Costo el primer año = 1,15% del valor comercial del bus de cada año (depreciación de 10% anual)	
Consideraciones								
Tasa de descuento [%]	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	7 %	Contratos de provisión de flota	
Valor residual del bus [%]	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	Depreciación lineal (10 o 14 años de vida útil)	
Plazo del préstamo [años]	10	10	14	14	14	14	Contratos de provisión de flota	
Tasa de interés [%]	Licitación	5 %	5 %	7 %	7 %	7 %	7 %	Contratos de provisión de flota
Tipo de cambio	UF	41,33						
	USD	727,6						

* Cargadores AC de 80kW

4 RESULTADOS

4.1 ESCENARIO BASE O DE LICITACIÓN

Las condiciones de licitación actual han creado un escenario en el cual los operadores que cuenten con más de 50 % de buses eléctricos en su flota por servicio, pueden obtener contratos de concesión con una duración de 7 años, con una posible extensión hasta 14. De forma similar, los contratos de operación tienen una duración de 5 años, con una posible extensión a 10, cuando la flota se compone de buses a diésel en más de 50 %. Las 15 rutas fueron evaluadas bajo estas condiciones, presentando un orden de magnitud promedio de los Costos Totales de Propiedad de USD \$18,1 millones de dólares en el caso de los buses a diésel y USD \$16,8 millones para los eléctricos. Si bien, los órdenes de magnitud son similares, debe recordarse que la temporalidad es importante. En estricto rigor no son comparables metodológicamente, sin embargo, este escenario permite indagar en el nivel de costos de ambas tecnologías operando bajo el nuevo modelo de negocio de la RED Metropolitana de Movilidad.

Además, los servicios mantienen distintas configuraciones en número de buses y kilómetros recorridos, y los órdenes de magnitud totales pueden ser mal interpretados. Por esta razón, se muestran también los costos por kilómetro para cada servicio, ya que de esta manera se elimina la temporalidad del análisis y, por ende, se normalizan los valores. El costo promedio por kilómetro para los buses a diésel se ubica en \$0,96 USD y para los buses eléctricos en \$0,65.

Costo Total de Propiedad por servicio y por kilómetro

Tabla 5. Órdenes de magnitud del Costo Total de Propiedad para cada servicio y por kilómetro [USD].

Servicio	km / año / bus	Número de buses	TCO por km [USD]					
			Contratos a 10 años		Contratos a 14 años			
			Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4
1	72 453	36	1,25	1,18	1,07	1,13	1,01	0,94
2	60 918	41	1,03	0,97	0,74	0,78	0,70	0,66
3	79 039	33	0,99	0,93	0,67	0,70	0,64	0,60
4	102 116	21	0,88	0,83	0,52	0,54	0,49	0,47
5	80 191	7	0,94	0,89	0,61	0,63	0,58	0,55
6	109 542	21	0,87	0,82	0,49	0,51	0,47	0,45
7	61 683	33	1,03	0,97	0,73	0,77	0,70	0,66
8	86 004	25	0,92	0,87	0,58	0,60	0,55	0,52
9	43 957	21	1,17	1,11	0,95	1,00	0,90	0,84
10	57 992	18	1,05	0,99	0,77	0,80	0,73	0,68
11	99 139	23	0,89	0,84	0,53	0,55	0,50	0,48
12	75 628	42	0,96	0,90	0,63	0,66	0,60	0,57
13	106 035	30	0,88	0,80	0,50	0,53	0,48	0,46
14	62 944	17	1,02	0,96	0,72	0,76	0,69	0,65
15	100 353	21	0,89	0,84	0,52	0,54	0,50	0,48
Promedio	79 866	26	0,98	0,93	0,67	0,70	0,64	0,60

Las rutas con mejores resultados de TCO son aquellas donde cada bus tiene mayor intensidad de uso o mayor kilometraje (servicios 13, 6, 4, 11 y 15). En estos servicios los kilómetros recorridos por cada bus pueden llegar a rondar los 300 al día, por lo que dadas las autonomías de los buses eléctricos, es posible que en estas rutas se tenga que proveer servicio con dos buses, lo cual puede resolverse mediante una adecuada gestión de flota. Por el contrario, en las rutas con los órdenes de magnitud de TCO más altos, los buses mantienen un kilometraje al día menor o cercano a los 200 km/día.

El TCO de ambos buses a diésel se encuentra por encima de los eléctricos. Se resalta que el bus diésel 1 tiene menor eficiencia energética que su par diésel 2 y por lo tanto presenta mayores costos totales en todos los servicios. En cuanto a los eléctricos, el bus eléctrico 2 presenta los mayores costos por kilómetro, lo que puede deberse a que es el bus más costoso dentro de la evaluación, ocupa el segundo lugar en consumo en energía y tiene uno de los packs de batería más costosos.

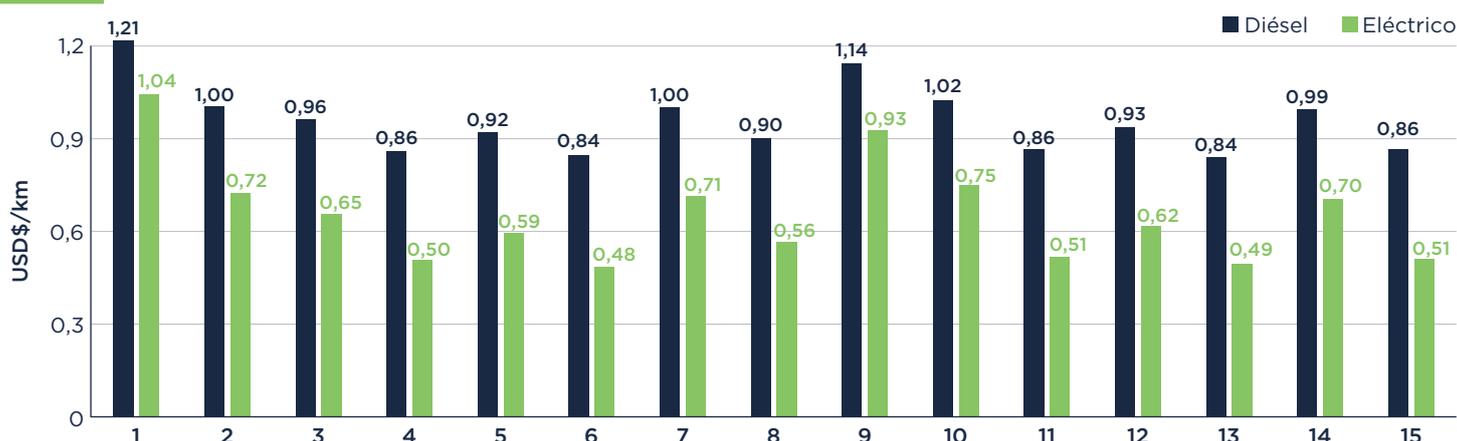


Gráfico 1. Comparación del Costo Total de Propiedad para cada servicio por kilómetro [USD]. Promedio de los buses diésel versus el promedio de los buses eléctricos.

Tabla 6. Desglose de Costos Totales de Propiedad, promedio para todos los servicios [USD].

Partida de Costo	TCO [USD]					
	Contratos a 10 años		Contratos a 14 años			
	Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4
Adquisición del vehículo	4 794 503	4 632 598	10 627 718	11 270 111	9 909 351	8 492 015
Adquisición de infraestructura	-	-	168 479	168 479	163 282	645 941
Adaptación de infraestructura	-	-	75 446	75 446	75 446	75 458
Combustible y DEF/Adblue	8 610 011	7 693 584	1 245 095	1 324 401	1 173 721	1 379 915
Mantenimiento preventivo	2 666 588	2 657 038	2 427 436	2 427 436	2 427 436	2 427 436
Mantenimiento correctivo	1 704 867	1 698 762	1 365 433	1 365 433	1 365 433	1 365 433
Revisión de vida media	563 037	543 662	133 465	141 532	124 443	106 644
Reemplazo de batería	-	-	384 848	384 848	384 848	384 848
Seguros	353 624	341 861	886 102	939 663	826 207	708 035
Costo Total de Propiedad	18 692 631	17 567 505	17 314 023	18 097 349	16 450 167	15 585 725

En el caso de los buses diésel, la partida de costo con mayor ponderación es el consumo de combustible, que en promedio constituye 45 % del total, seguido del costo de compra del activo, al que se le atribuye un 26 % del TCO. En contraste, el mayor costo de los buses eléctricos corresponde al de compra de los activos, que compone 61 % del total (incluye adquisición del vehículo, infraestructura y el reemplazo de batería), seguido del mantenimiento (preventivo y correctivo), que constituye 21 % a los costos.

El orden de magnitud del costo de adquisición de los buses eléctricos representa poco más del doble que sus pares a diésel. Los activos de los



primeros forzosamente tienen que considerar los costos asociados a la infraestructura de recarga, que representan aproximadamente 8 % de los costos totales de propiedad y 13 % de los costos de capital. Por otro lado, la alta tasa de interés no ha favorecido a la tecnología eléctrica, por requerir más tiempo para amortizar el gasto del activo, entre otros factores estructurales. No obstante, bajo el nuevo modelo de negocios sigue siendo menor el TCO de los buses eléctricos, ya que en el caso de los diésel el costo de la energía, de mantenimiento y la revisión de vida media son sustancialmente más elevados. El costo por consumo de energía eléctrica es 82 % menor que el costo por consumo del diésel.

El mantenimiento preventivo es otra de las partidas de costo importantes en ambas tecnologías. En la eléctrica este costo implica 14 % promedio del total y en la diésel, 15 %. Sin embargo, debe resaltarse que el mantenimiento en general aumenta su costo progresivamente a medida que los buses se degradan por su uso, cuestión que este análisis no considera. Se estimó que el mantenimiento correctivo contribuye con 8 % en el caso de los buses eléctricos y 9 % en el caso de los de propulsión a diésel; en ningún caso se incluyen repuestos, la frecuencia esperada de reemplazo de partes es mayor para los diésel que para los eléctricos, así que aún con mayor costo por repuesto para los eléctricos, no se esperarían mayores costos totales. Así mismo, en ambos casos se tienen órdenes de magnitud similares, pero debe considerarse que el nuevo modelo de negocio contempla un contrato de operación de 14 años para los eléctricos y 10 para los diésel. Considerando lo anterior, estos resultados demuestran que el mantenimiento es 38 % promedio más económico en los eléctricos que en los buses a diésel anualmente.

En el caso del combustible, de representar 45 % del TCO en el caso de los buses a diésel, pasa a un 8 % en la operación de buses eléctricos. Este cambio se debe a la eficiencia energética y a los dispares costos de la energía y el combustible. Según datos del Centro de Control y Certificación Vehicular de Chile (3CV), los buses diésel utilizados en el presente análisis consumen 78 % más energía por kilómetro que los eléctricos. También cabe resaltar que la energía eléctrica usada proviene de fuentes renovables, ya que la licitación así lo exige.

Desglose del Costo Total de Propiedad, promedio de todos los servicios por kilómetro

Al igual que en la sección anterior, para presentar el desglose de costos, se muestran promedios de todos los servicios. Los costos por kilómetro permiten normalizar los resultados. En los buses diésel el costo por kilómetro es en promedio de \$0,96 y de \$0,65 en los eléctricos. Los buses eléctricos tienen en promedio 32 % menos costos a lo largo de toda la duración de un contrato de operación, ampliado a la máxima temporalidad permitida actualmente. A continuación, se muestra el desglose de los costos promedio por kilómetro.

Tabla 7. Desglose de Costos Totales de Propiedad por kilómetro, promedio para todos los servicios [USD].

Partida de costo	TCO [USD/km]					
	Contratos a 10 años		Contratos a 14 años			
	Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4
Adquisición del vehículo	0,265	0,256	0,419	0,445	0,391	0,335
Adquisición de infraestructura	-	-	0,007	0,007	0,006	0,025
Adaptación de infraestructura	-	-	0,003	0,003	0,003	0,003
Combustible y DEF/Adblue	0,443	0,397	0,046	0,049	0,043	0,051
Mantenimiento preventivo	0,137	0,137	0,089	0,089	0,089	0,089
Mantenimiento correctivo	0,088	0,088	0,050	0,050	0,050	0,050
Revisión de vida media	0,031	0,030	0,005	0,006	0,005	0,004
Reemplazo de batería	-	-	0,015	0,015	0,015	0,015
Seguros	0,020	0,019	0,035	0,037	0,033	0,028
Costo Total de Propiedad	0,98	0,93	0,67	0,70	0,64	0,60

El bus eléctrico con mayor costo por kilómetro es el 2, que se diferencia del resto por tener mayor potencia de motor, autonomía y capacidad de batería, por lo que es más caro en el mercado, con una inversión promedio requerida de USD \$0,45/km. Un costo que no existe en el caso de la tecnología a diésel es el recambio de baterías, en los eléctricos esto representa 2 % de los costos totales de propiedad. Si bien puede parecer un costo relativamente bajo, esto se debe a que se consideró una bajada de precio de la batería en función del kWh al 2030 (ver sección 3.5).

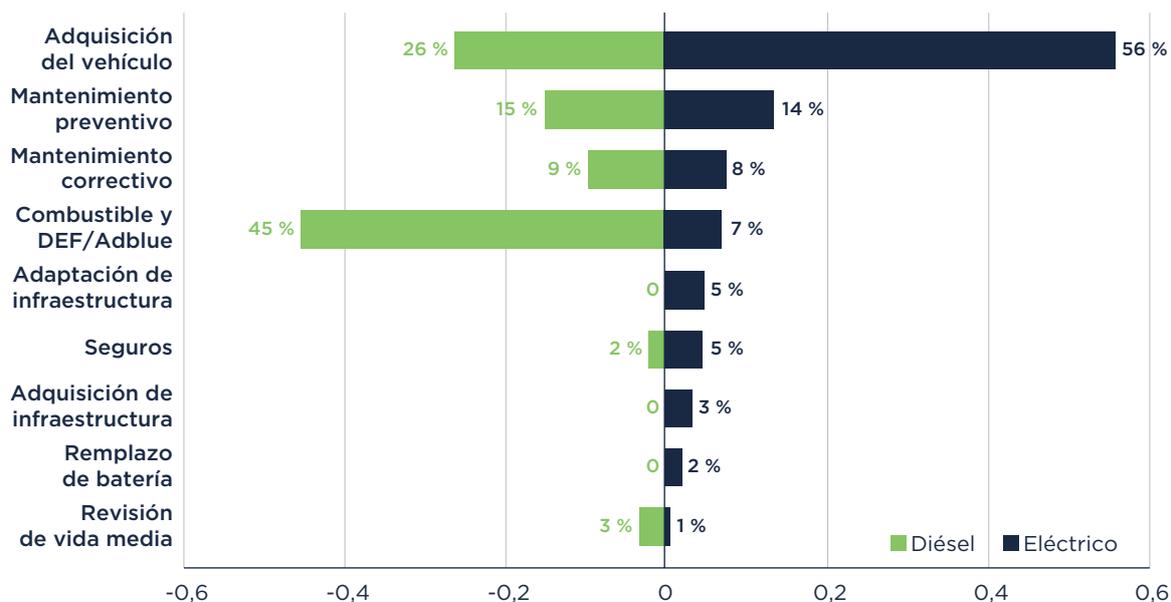


Gráfico 2. Desglose de Costos Totales de Propiedad en porcentaje, promedio por tecnología de bus para todos los servicios [\$USD].

4.2 ESCENARIOS PARA EVALUAR LA SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS

Existen factores que podrían modificar la estructura de costos en la adquisición de flota. Para determinar sus rangos e impactos, se realizaron seis escenarios con la finalidad de evaluar la sensibilidad de la estructura de costos al intervenir variables críticas de operación. Dichos escenarios buscan evaluar los riesgos ante posibles cambios en el contexto de la operación y así orientar la toma de decisiones estratégicas. A continuación, se describen los escenarios de sensibilidad y los resultados obtenidos de los mismos.

Tabla 8. Escenarios de sensibilidad analizados.

Escenario	Variable modificada
Contratos de concesión de vías a 14 años	Años buses diésel y 4 años más de pago de cuota
Variaciones en los costos de mantenimiento	Mantenimiento preventivo y correctivo
Volatilidad del diésel	Precio del diésel

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. ESCENARIO: CONTRATOS DE CONCESIÓN DE USO DE VÍAS EXTENDIDO A 14 AÑOS

La duración de los contratos de suministro de buses y de concesión de uso de vías influye significativamente en el TCO. Un operador puede trabajar con ambas tecnologías, pero cada una tiene implicancias distintas, por lo que tendrá que decidir cuál de estas le permite maximizar sus beneficios. Mientras más largos sean los contratos, se logran amortizar de mejor manera los costos de la inversión. Sin embargo, la tecnología a diésel llega más rápido al término de su vida útil y requiere de un reemplazo. En cambio, la tecnología eléctrica contiene menos partes móviles y se espera mayor tiempo de vida útil.

Los contratos de provisión de flota con la legislación vigente serán siempre de 10 años para los diésel y de 14 para los eléctricos, en cambio, los de concesión de uso de vías hacen distinción entre las temporalidades contractuales si se opera con buses diésel o eléctricos, afectando considerablemente la estructura de costos y, por lo tanto, podría ser decisivo en la elección tecnológica del operador. Este escenario es un ejercicio de rigor metodológico de TCO, con el que se intenta simular qué sucedería en el caso de llevar ambas tecnologías a un mismo horizonte contractual de 14 años, y contar con una comparación bajo las mismas condiciones. No es que los operadores puedan acceder directamente a esta duración, esto depende de que puedan cumplir correctamente con el primer periodo de servicio de operación (7 años en el caso de los eléctricos y de 5 en los diésel) y luego de eso, se extenderá el contrato solo si los buses todavía se encuentran en posibilidades de extender su vida útil por un periodo igual adicional y los indicadores de servicio son cumplidos. Una concesión con una temporalidad más larga, aun cuando existen riesgos técnicos y posibles imprevistos, permite mejorar la estabilidad financiera y la planeación del operador. Sin embargo, actualmente, los buses diésel no tienen permitido operar en el RED con más de 10 años de uso. La distinta duración en los contratos de concesión está asociada a la tecnología. En el caso de los buses diésel el overhaul debe realizarse como responsabilidad del suministrador a los 5 años de operación del bus, según lo estipulado por la autoridad e independiente a las garantías del fabricante. En los buses eléctricos, el hito lo marca el recambio de batería, en ellos se ha estipulado una revisión del estado de la batería a los 7 años, independiente a las garantías del fabricante¹⁶, y por lo tanto, la duración del contrato está

¹⁶ En el caso de los contratos de provisión revisados, las baterías tienen garantías entre los 8-10 años, o los 600 000 km u 800 000 en algunos casos.

asociada a este periodo estimado, en el cual el bus puede mantenerse en adecuado funcionamiento. La extensión depende de la correcta operación y el estado del bus.

Llevar los buses diésel a 14 años implicó considerar una sustitución por un nuevo bus a partir del 11º año. Para simular el costo de adquisición, se adicionaron las cuotas de arrendamiento (leasing) por 4 años más, cuyo valor mensual fue tomado de los contratos de Provisión analizados en el presente. El resto de los costos siguieron la misma inercia de estimación que todos los años de operación. No debe confundirse esta supocisión, cuya finalidad es contar con un ejercicio de rigor metodológico que implica llevar a la misma temporalidad los contratos de suministro, de ninguna manera se sugiere un contrato nuevo para 4 años.

Cuando el TCO es llevado a 14 años, los buses a diésel se ven afectados al adicionar 4 años de arrendamiento de buses nuevos que reemplacen los que han terminado con su vida útil, para cumplir con el estándar del servicio. Es importante recordar que los contratos actuales son leasing con opción a compra y se paga una cuota de arriendo mensual o quincenal. Los resultados indican que los buses a diésel aumentan 20 % el orden de magnitud de su TCO cuando son llevados a 14 años, pero el costo por kilómetro disminuye 16 %, pasando de \$0,96 a 0,83 dólares por kilómetro debido a que la intensidad de uso permite compensar la inversión de mejor manera.

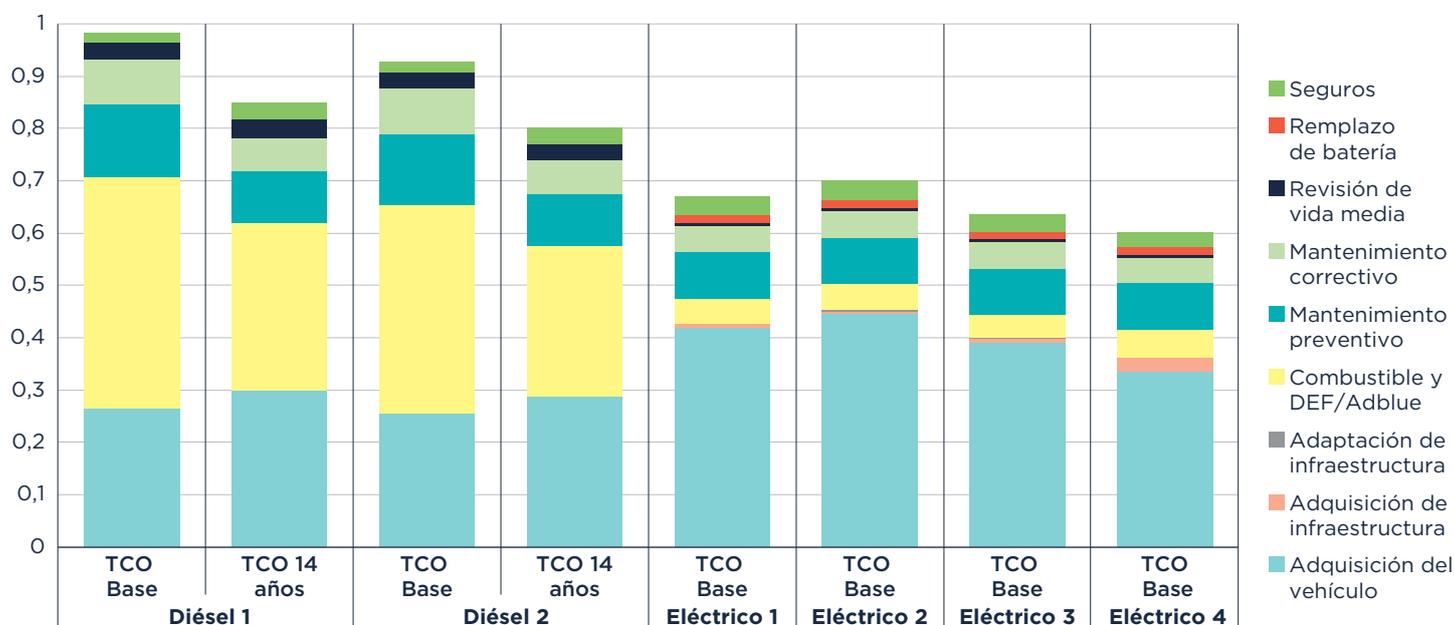


Gráfico 3. Desglose de Costos Totales de Propiedad por kilómetro, promedio para todos los servicios. Escenario de contrato de concesión de 14 años [USD].

ESCENARIO: VARIACIONES EN EL COSTO DE MANTENIMIENTO EN LOS BUSES ELÉCTRICOS

Los costos de mantenimiento son el rubro donde existe mayor asimetría de información entre operadores y entidades reguladoras. Se encuentran mezclados entre los contratos de concesión y suministro (ver sección 3.4). Primeramente, los contratos de suministro no son claros en el desglose de este rubro para ninguna de las dos tecnologías, se exhiben cifras agregadas de distinta forma que no permiten parametrizar y comparar entre los distintos contratos de provisión o marcas comerciales. Además, los buses eléctricos que actualmente se encuentran en operación, no han cumplido con siquiera la mitad de su vida útil, por lo que las certezas en los costos de mantenimiento correctivo y su orden de magnitud se desconocen para todo su TCO bajo las condiciones del RED Metropolitano, aunado a la falta de precisión de los contratos. La operación con esta tecnología todavía es incipiente.

La literatura ha documentado que los costos de mantenimiento en los eléctricos son menores que en los diésel¹⁷. Los cambios en los costos de mantenimiento de los buses eléctricos asumen una variación aproximada de $\pm 25\%$ en el mantenimiento preventivo y de $\pm 11\%$ mantenimiento correctivo. Estas variaciones surgen de conversaciones con distintos fabricantes, operadores y expertos, y tienen el objetivo de dar un margen adecuado ante fallos no planeados al momento de considerar este costo, por ejemplo, la compra de repuestos en caso de necesitarlos. De todas formas, las primeras flotas de buses eléctricos en operación en la ciudad han reportado costos de mantenimiento 37 % menores por kilómetro (0,17 USD/kilometro para buses eléctricos y 0,27 USD/km para buses diésel)¹⁸.

Los costos de mantenimiento incluyen chasis, carrocería y mano de obra. No incluyen los repuestos porque estos dependen en gran medida de la calidad con que se lleva a cabo el mantenimiento preventivo y la gestión de la flota (uso de la batería). Sin embargo, lo que se incluye en este porcentaje son reparaciones equivalentes a fallas no planeadas, desastres naturales atípicos, vandalismo, etcétera. Bajo dichos supuestos, los resultados de TCO de los buses eléctricos sufrieron una variación de $\pm 3\%$. En todos los casos, los eléctricos siguen siendo más económicos por kilómetro que los buses diésel a lo largo de toda su vida útil. Esto significa que este margen total de $\pm 36\%$ de

17 ZEBRA 2020. *From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile*. https://www.c40knowledgehub.org/s/article/From-Pilots-to-Scale-Lessons-from-Electric-Bus-Deployments-in-Santiago-de-Chile?language=en_US.

18 Ver <https://c40.my.salesforce.com/sfc/p/#36000001Enhz/a/1Q000000gQSS/6tjV3J4pITb1YT4.IHDcerA5AZ36sQmeRFWnDDxfW4g>.

los costos de mantenimiento no modifica la estructura del TCO de los buses eléctricos sustancialmente.

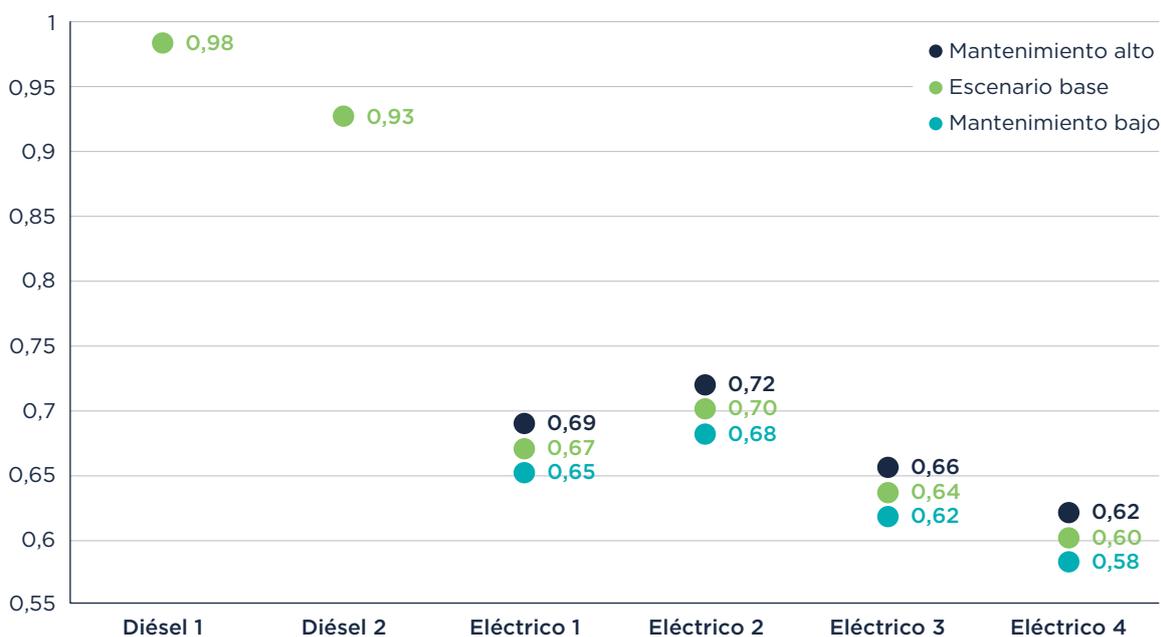


Gráfico 4. TCO por kilómetro promedio para todos los servicios, considerando variaciones en los costos de mantenimiento [\$USD].

4.2.2 ESCENARIO: VOLATILIDAD DEL DIÉSEL

La volatilidad en el precio del diésel responde a variables macroeconómicas exógenas al país y está fuertemente asociada al precio del petróleo. Chile importa 98 % del petróleo que refina y para estabilizar su fluctuación cuenta con un Mecanismo De Estabilización De Precios De Los Combustibles, así como con un fondo para ello. En los últimos dos años el precio del barril del petróleo Brent ha mostrado un aumento generalizado en el mundo, con un promedio de USD \$80 por barril (2010-2019). Sin embargo, el Banco Central de Chile ha reportado en su Informe de Política Monetaria de junio de 2021, que espera que el precio de este pase del promedio de USD \$80 a los \$60 dólares en los próximos diez años. Sin embargo, lo que ha sucedido es que cada vez es más cara su extracción y su precio ha aumentado debido a escasez y factores macroeconómicos ocasionados por la pandemia COVID-19 y sus secuelas en la economía mundial, que se prevé durarán unos años más. Así mismo, a nivel nacional se avecinan imposiciones a las emisiones del carbono, por lo que es posible que este costo continúe fluctuando en los próximos años. Por esto, se realizó una valoración de la variación del precio del diésel en función de la volatilidad del precio del petróleo. Lo anterior

permite dar señales sobre los costos de operación, considerando un aumento generalizado en el precio del diésel. Este escenario se considera conservador, ya que uno optimista sería una baja en el precio, cuestión que no pone en riesgo financiero al operador.

Para su estimación se realizó un escenario de costo nivelado del diésel, es decir, se estimó el precio para cada año de la evaluación basado en un factor de modulación anual estimado por la Comisión Nacional de Energía, para su fijación de precios de nudo de corto plazo. Este factor considera la volatilidad en su precio mediante un ajuste basado en el índice de precios al consumidor de EEUU (CPI, por sus siglas en inglés) o valores reales, asociados a la inflación con respecto a un año base (2013).

El TCO por kilómetro de los buses diésel en el escenario de diésel nivelado aumentó 5 % en promedio, con respecto al escenario base y considerando la volatilidad del petróleo de los últimos años.

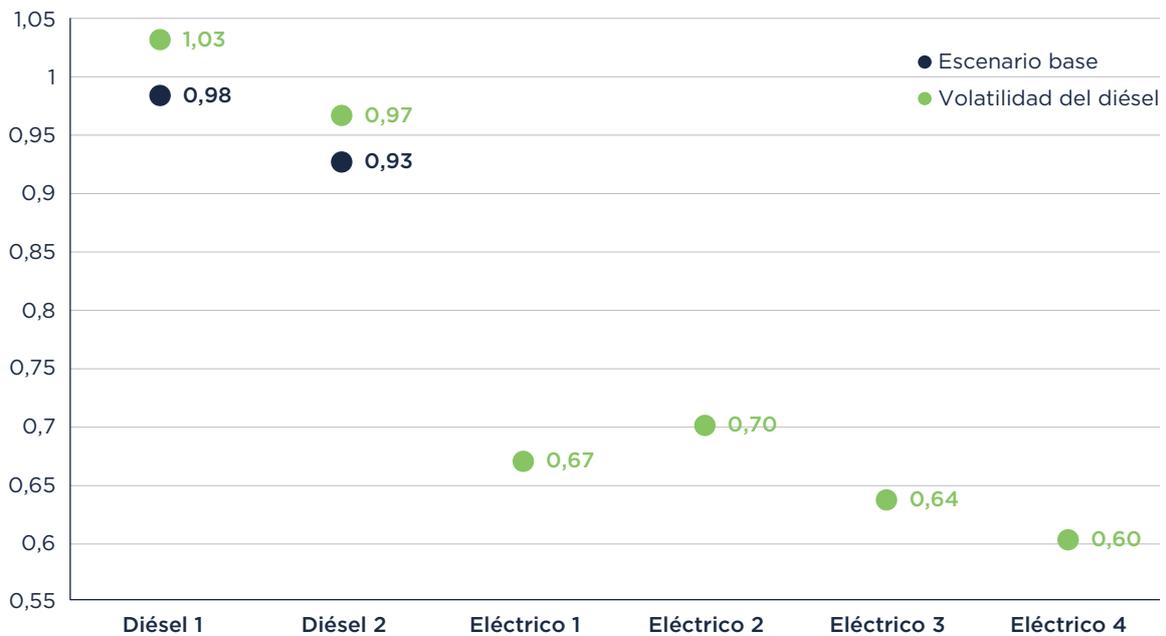


Gráfico 5. TCO por kilómetro promedio para todos los servicios, escenario de volatilidad del diésel [USD].

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los escenarios analizados muestran la alta competitividad de los buses eléctricos para operar bajo las condiciones establecidas en el sistema RED. Si bien, existen factores que aumentan o restringen esta competitividad tecnológica, vemos que los buses eléctricos pueden tener resultados robustos y ser la tecnología de preferencia de los operadores del transporte público de Santiago. Cabe resaltar que los costos totales de propiedad de los buses son pagados finalmente por el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones a través de los suministradores y los operadores. Los terminales de autobuses también son responsabilidad del MTT, sin embargo, la adecuación de la red eléctrica (fuera del terminal) es responsabilidad de la empresa proveedora de energía.

El MTT se encarga de pagar una Cuota de Flota [UF/bus] al suministrador de flota, misma que está estipulada en el contrato celebrado entre estos, y a través de él, el suministrador asume la responsabilidad de los costos de capital. En medio se encuentra el financista de los buses, que en algunos contratos es un tercero y en otros es el fabricante. En el presente análisis, el suministrador absorbe 30 % del costo total de propiedad de los buses diésel y 66 % en el caso de los eléctricos.

Por otro lado, el operador recibe del MTT un pago por pasajero transportado y por kilómetro recorrido, ya estipulado en el contrato de concesión de vías. A cambio, incurre en los costos de la energía, el mantenimiento y su certificación, además de la adaptación de la infraestructura dentro del terminal. Se encarga de implementar el Plan de Mantenimiento tanto preventivo y correctivo diseñado por el suministrador, y éste último sólo lo certifica de forma independiente. Los costos que incurre el operador corresponden a 70 % del costo total de propiedad en los buses a diésel y a 34 % en el caso de los buses eléctricos.

Tabla 9. Distribución de la responsabilidad del TCO del Red Metropolitano.

Responsable del costo	Partida	Distribución porcentual de los costos de TCO					
		Contratos a 10 años		Contratos a 14 años			
		Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4
Suministrador de flota	Adquisición del vehículo	26,92 %	27,65 %	62,62 %	63,49 %	61,50 %	55,74 %
	Adquisición de infraestructura	-	-	0,99 %	0,95 %	1,02 %	4,24 %
	Reemplazo de batería	-	-	2,27 %	2,17 %	2,39 %	2,53 %
	Revisión de vida media	3,16 %	3,25 %	0,79 %	0,80 %	0,77 %	0,70 %
	Total	30,08 %	30,90 %	66,67 %	67,41 %	65,68 %	63,21 %
Operador	Adaptación de infraestructura	-	-	0,44 %	0,43 %	0,47 %	0,50 %
	Combustible y DEF/Adblue	45,06 %	42,82 %	6,84 %	6,95 %	6,79 %	8,44 %
	Mantenimiento preventivo	13,95 %	14,79 %	13,33 %	12,75 %	14,04 %	14,85 %
	Mantenimiento correctivo	8,92 %	9,45 %	7,50 %	7,17 %	7,90 %	8,35 %
	Seguros	1,99 %	2,04 %	5,22 %	5,29 %	5,13 %	4,65 %
	Total	69,92 %	69,10 %	33,33 %	32,59 %	34,33 %	36,79 %

Lo anterior es importante porque una de las barreras para la operación con buses eléctricos en las ciudades de la región es el acceso al financiamiento para la compra del vehículo. Cuando el estado asume el costo de capital del bus, asume el riesgo que antes asumían los operadores y, con ello, mejora la estructura de costos de operación. Así, la empresa operadora puede enfocar todos sus esfuerzos en la gestión de la flota, la calidad del servicio y en cumplir correctamente con los programas de operación. En el caso de los buses a diésel se invierten los papeles, la mayoría del TCO lo incurre el operador como consecuencia de los altos costos del combustible de esta tecnología, a pesar de que el precio de compra es más económico y, por consecuencia, los seguros también.

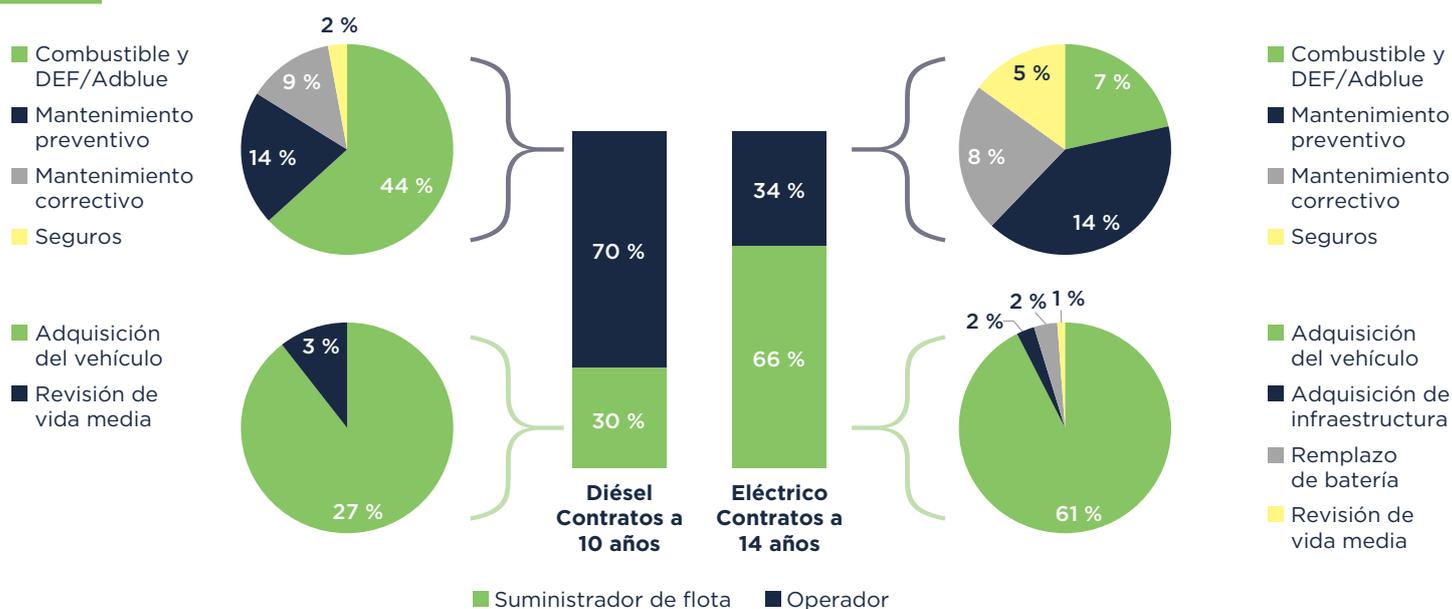


Gráfico 6. Síntesis de la distribución porcentual de la responsabilidad en la partida de costos del TCO entre Operador-Suministrador del Red Metropolitana de Santiago.

Fuente: elaboración propia.

Desde la perspectiva de costos anteriormente mencionada, para un operador sería más conveniente operar con tecnología eléctrica. Primeramente, el TCO por kilómetro de todas las rutas operando con electromovilidad es en promedio 32 % más económico que el de la tecnología a combustión. En segundo lugar, si dividimos el TCO total según los porcentajes que incurre cada actor en el nuevo modelo de negocio de la RED metropolitana, el TCO de operación de los buses eléctricos se encuentra cercano a los USD \$0,22 por kilómetro, mientras que el de los diésel se ubica alrededor de los USD \$0,67 por kilómetro. En los buses diésel, 70 % del TCO/km lo incurre el operador, en cambio, en los eléctricos, el 66 % lo incurre el suministrador.

Tabla 10. TCO por kilómetro según la entidad responsable de incurrir en el costo.

Tecnología	TCO/km [USD]	
	Diésel	Eléctrico
TCO total	0,96	0,65
TCO de suministro	0,29	0,43
TCO de operación	0,67	0,22

Bajo el nuevo modelo de negocio, disminuyen sustancialmente los riesgos financieros para adquirir buses eléctricos, aun cuando supone cambios de paradigmas y aprendizajes sobre la gestión de flota con una tecnología que

todavía es incipiente en sus operaciones a gran escala. Además, la nueva licitación redujo el tamaño de las concesiones a un promedio de 400 buses por operador, lo que permite enfocar esfuerzos en cumplir íntegramente con el Programa de Operación designado por la entidad reguladora (DTPM en este caso).

Todos estos incentivos para integrar buses eléctricos a la Red Metropolitana tienen implícitos muchos cambios en el modelo de negocio. Antes, el pago de la cuota de arrendamiento se basaba en el pago por pasajero transportado, sin embargo, los altos índices de evasión del pago de pasaje ha provocado que ahora, este se base en los kilómetros recorridos (75 %) y en menor medida en la cantidad de pasajeros transportados (25 %). Con ello, las unidades de servicio con mayor kilometraje cobran mayor relevancia. No es coincidencia que los servicios o rutas con TCO por kilómetro más bajo son aquellas que tienen mayor kilometraje recorrido (no necesariamente mayor cantidad de buses), como se muestra en la tabla 10. Se analizó también la covarianza y correlación entre el kilometraje y los resultados de cada ruta, y se encontró que estos son inversamente correlacionados ($r = -0,8$): a medida que aumentan los kilómetros recorridos, disminuye el TCO.

Tabla 11. TCO por kilómetro para cada ruta evaluada, ordenadas de menor a mayor TCO.

Servicio	Número de buses por servicio	km / año por servicio	TCO por km [USD]					
			Contratos a 10 años		Contratos a 14 años			
			Diésel 1	Diésel 2	Eléctrico 1	Eléctrico 2	Eléctrico 3	Eléctrico 4
6	21	109 542	0,87	0,82	0,49	0,51	0,47	0,45
13	30	106 035	0,88	0,80	0,50	0,53	0,48	0,46
4	21	102 116	0,88	0,83	0,52	0,54	0,49	0,47
15	21	100 353	0,89	0,84	0,52	0,54	0,50	0,48
11	23	99 139	0,89	0,84	0,53	0,55	0,50	0,48
8	25	86 004	0,92	0,87	0,58	0,60	0,55	0,52
5	7	80 191	0,94	0,89	0,61	0,63	0,58	0,55
12	42	75 628	0,96	0,90	0,63	0,66	0,60	0,57
3	33	79 039	0,99	0,93	0,67	0,70	0,64	0,60
14	17	62 944	1,02	0,96	0,72	0,76	0,69	0,65
7	33	61 683	1,03	0,97	0,73	0,77	0,70	0,66
2	41	60 918	1,03	0,97	0,74	0,78	0,70	0,66
10	18	57 992	1,05	0,99	0,77	0,80	0,73	0,68
9	21	43 957	1,17	1,11	0,95	1,00	0,90	0,84
1	36	72 453	1,25	1,18	1,07	1,13	1,01	0,94
Promedio	25,93	79 866,24	0,98	0,93	0,67	0,70	0,64	0,60

Por último, los escenarios de sensibilidad proporcionan una orientación sobre cómo puede afectarse la estructura de costos con posibles cambios en variables críticas. Por ejemplo, igualar la duración de los contratos de concesión a 14 años no favorece el TCO de los buses a diésel por kilómetro, este aumenta un 5 % con respecto al escenario base o de licitación. Bajo el marco actual, si la vida útil de los buses termina naturalmente, el MTT deberá encargarse a tiempo de proveer los buses nuevos. No hay posibilidad de extender los buses diésel a 14 años, ya que el suministro, independientemente de la tecnología, no depende del operador, el contrato de Concesión de Vías es independiente al de suministro. Este escenario fue un ejercicio para comprobar la competitividad de los buses eléctricos, igualando las condiciones temporales de la evaluación del TCO.

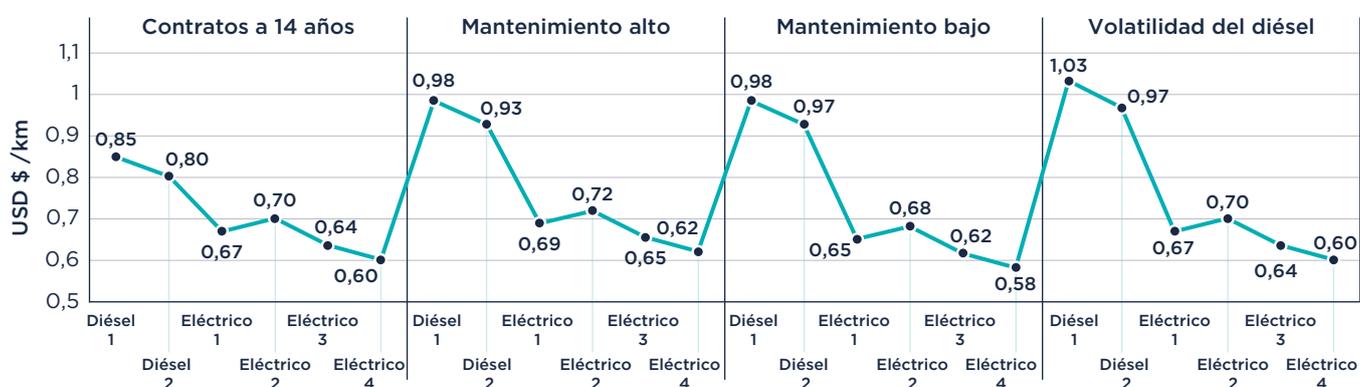


Gráfico 7. TCO por kilómetro promedio de todas las rutas para cada escenario evaluado [USD\$/ km].

Por otro lado, los escenarios de modificación de las cuotas de mantenimiento de los buses eléctricos en un rango de $\pm 18\%$ solo producen una variación del resultado del TCO/km de $\pm 3\%$ con respecto al escenario base. Cabe recordar que un bus eléctrico no requiere cambio de aceite, reemplazo de filtros, etcétera. En términos prácticos requiere de la provisión de líquido de transmisión y refrigerante de motor¹⁹. El mantenimiento correctivo en los buses eléctricos está fuertemente vinculado a la reposición de componentes por accidentes y/o vandalismo, y el mantenimiento preventivo a una correcta gestión de flota (que incluya estrategia de recarga). Las garantías solo se cumplen cuando los planes de mantenimiento provistos por el suministrador son seguidos correctamente y su certificado lo ratifica. En el caso de los buses eléctricos, los contratos revisados incluyen en su mayoría 3 años de

¹⁹ Aamodt, Cory, Coney. *Electrifying transit: a guidebook for implementing battery electric buses*. 2021. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>



protección a la estructura y carrocería, 5 años para el motor y entre 8 y 10 años para la batería, con una degradación no superior al 20-30 %. En cambio, para los buses diésel la garantía para el chasis, la carrocería y el tren motriz solo está disponible máximo 3 años. Las garantías difieren por marca, pero son evidencia de las distintas posibilidades de ahorro en el mantenimiento de los eléctricos en comparación con los buses diésel.

Por último, el TCO de los buses diésel en el escenario que simula la volatilidad del diésel aumenta en promedio 5 %, en referencia al escenario base. Condiciones exógenas (como el caso del conflicto en Ucrania) pueden impactar significativamente en los precios del combustible, aunado a las discusiones sobre el impuesto a las emisiones de CO₂ que se prevén en Chile, lo que representa muchos riesgos financieros para el operador, puesto que a medida que los buses eléctricos perfeccionen su tecnología y ganen espacio en el transporte público, los buses diésel se limitarán a operaciones excepcionales. Así mismo, los operadores tienen oportunidad de negociar el precio del diésel y obtener costos preferenciales, pero no es lo más promisorio cuando se ha proyectado dejar de operar con buses diésel a partir de 2035²⁰. Se señala que con los buses eléctricos también es posible llegar a buenos términos con los precios de la energía. Además, la licitación de Concesión de Uso de Vías estipula que la energía eléctrica debe provenir de fuentes renovables.

20 La Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile prevé que a partir de 2035 todos los buses del Transporte Público deberán ser eléctricos.

6 CONCLUSIONES

Aún con costos de inversión más elevados e igualando la temporalidad en los contratos de concesión, sigue siendo más viable económicamente la adopción de buses eléctricos en el sistema de transporte público de Santiago de Chile. A través del presente, se comprobó la competitividad económica de los buses eléctricos operando bajo el nuevo modelo de negocio de la RED Metropolitana de Santiago (ver sección 3.1). En promedio, el TCO de estos es 32% menor que el TCO de los diésel. Los resultados arrojaron que la media del TCO por kilómetro en los buses eléctricos es de USD \$0,65/km (error estándar de $\pm 0,04$ %, con 95 % de confianza), mientras que los diésel es de USD \$0,96/km (error estándar de $\pm 0,03$ %, con 95 % de confianza).

Por exigencia de la licitación, los operadores actuales de buses eléctricos tienen que hacer más eficiente la infraestructura eléctrica, utilizando 3,75 cargadores por bus, en vez de 2 como se hacía en un inicio. Esta nueva proporción permite ahorrar cerca de 40 % en los costos de infraestructura de recarga. Lo importante es el hecho de que es posible mejorar el ratio (buses por cargador) y ahorrar en costos cuando se mejora la gestión de flota y la estrategia de recarga. Este ratio no puede generalizarse a todas las operaciones con buses eléctricos, puede variar según las condiciones locales de la operación, del terminal, del cargador y del bus.

Dado que los buses eléctricos que operan actualmente en la RED Metropolitana aun no cumplen la totalidad de su vida útil, existen brechas de información asociadas a los costos de algunas variables, como el mantenimiento. Con un nivel de significancia de 4 %, existe evidencia estadística para afirmar que el costo de mantenimiento de los buses eléctricos es 38 % menor que en los diésel para los servicios de la presente evaluación. La autoridad (adicional a los operadores) también debe monitorear el desgaste de los buses y el mantenimiento al cual son sometidos para mejorar el entendimiento de estos costos y no dejar esta información únicamente en manos de los operadores. En la Ilustración 3 se resumen las principales conclusiones de la presente evaluación.

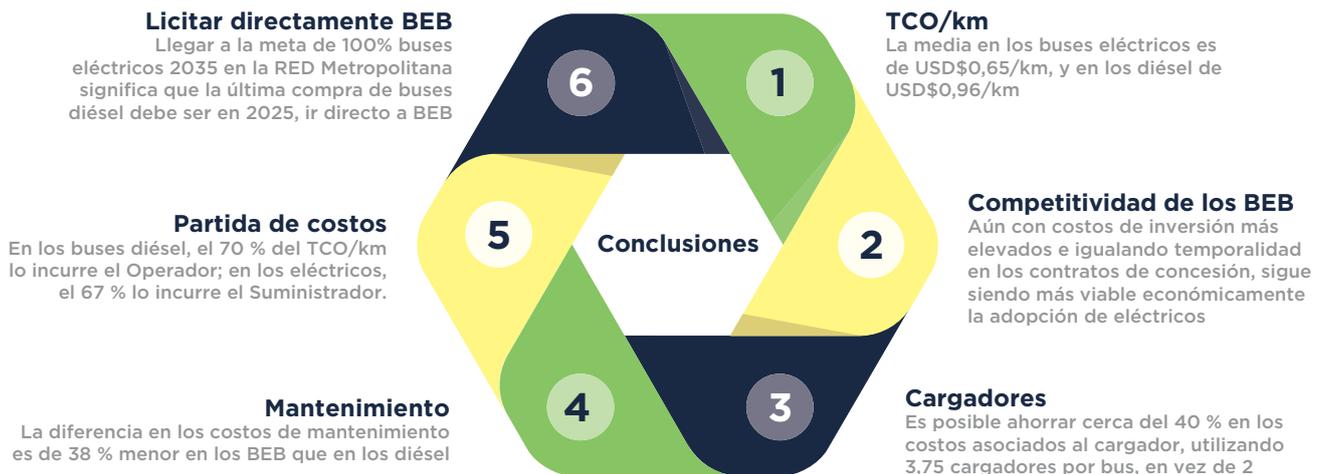


Ilustración 3. Conclusiones de la presente evaluación del TCO bajo las condiciones de licitación.

Fuente: elaboración propia (plantilla Infograpify.com).

La competitividad de los buses eléctricos depende de una serie de factores, entre los cuales es importante resaltar las condiciones estructurales de los procesos de renovación de flota en la ciudad y los roles que deben jugar operadores y autoridades reguladoras de transporte. Según los resultados, en el caso de la RED Metropolitana de Santiago, las responsabilidades en la partida de costos difieren por tecnología: en los buses diésel, 70 % del TCO/km lo incurre el operador, mientras que en los eléctricos, 67 % lo incurre el suministrador.

Hemos constatado un exitoso crecimiento de los servicios operando con buses eléctricos. El presente análisis aclara la competitividad de esta tecnología y los factores principales que la afectan, sin embargo se recomienda un monitoreo más extensivo de flota y cargadores de parte de la autoridad para mejorar el conocimiento sobre la operación y sus costos, con el fin de transparentarlos. Se deben buscar los mecanismos para que se pueda acceder a esta información y su conocimiento no se limite únicamente a las empresas operadoras.

Es indispensable para la ciudad fortalecer esta apuesta por tecnologías bajas en carbón. Actualmente, 25 % de la flota de la RED es eléctrica. Si bien existen impactos económicos y operacionales, los beneficios en ambos casos son mayores. Aún así, todavía existen oportunidades de mejorar el TCO si en las próximas licitaciones de los buses eléctricos se hacen requerimientos de personalización del bus para cada tipo de servicio, es decir, se exige la autonomía necesaria para cada caso, por lo que se recomienda evaluar esta posibilidad, sin mencionar los co-beneficios en reducción de emisiones locales,

consumo de combustible y otras externalidades negativas que puedan tener las operaciones con buses diésel.

Esperamos que la ciudad muestre aún más liderazgo en la región y podamos contar con una flota 100 % eléctrica en el corto plazo, antes de la actual fecha establecida por el DTPM (2035) para nuevas incorporaciones. Todavía se requieren más evaluaciones para ampliar la cobertura eléctrica a otras operaciones, como las de buses articulados (tipo C), por lo que se recomienda realizar una evaluación de TCO de estos, cuyo fin es visibilizar el performance y costos asociados, y con ello, la competitividad de migrar también a buses eléctricos de este tamaño. En la Ilustración 4 se presentan las principales recomendaciones de la presente evaluación.



Ilustración 4. Principales recomendaciones de la presente evaluación.

Fuente: elaboración propia (plantilla Infograpify.com).

CONTACTO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org



SOCIO DE APOYO



AGENCIA DE FINANCIACIÓN



SOCIOS IMPLEMENTADORES