Evaluación de resultados, lecciones aprendidas y provisión de recomendaciones técnicas para el despliegue de buses eléctricos

Assessment of results, lessons learnt and provision of technical recommendations for e-bus deployment

Proyecto "Leapfrogging to e-buses in Costa Rica"

Ejecutado por:

ONU programa para el medio ambiente

Financiado por:

CRUSA Cambiando VIDAS

Presentación

El proyecto "Dando el salto a los autobuses eléctricos en Costa Rica" ("Leapfrogging to electric buses in Costa Rica", en inglés) es ejecutado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y financiado por la Fundación Costa Rica Estados Unidos para el Desarrollo (CRUSA). Este proyecto busca generar información técnica de utilidad y necesaria para la introducción y escalamiento de autobuses eléctricos en el transporte público del Área Metropolitana de San José (AMSJ).

Este reporte forma parte del proyecto "Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica", a través del acuerdo celebrado entre PNUMA y el International Council on Clean Transportation (ICCT), que busca acelerar el desarrollo de la movilidad eléctrica en Latinoamérica, abordando en este caso a Costa Rica. En el presente estudio se profundiza en el aspecto financiero, a través del análisis comparativo del Costo Total de Propiedad (TCO, por sus siglas en inglés) entre flotas con buses eléctricos y diésel, que circular en las rutas y ramales del AMSJ, bajo las condiciones de operación actual.

El alcance de este estudio parte del análisis de las rutas de transporte público del Área Metropolitana de San José (AMSJ) realizado como parte del proyecto "Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica". En ese estudio se modeló en dos fases el desempeño de 152 rutas y ramales dentro del AMSJ, a partir de los datos de georreferenciación brindados por el Consejo de Transporte Público (CTP), a través de Radiográfica de Costa Rica (RACSA), así como datos complementarios suministrados por la Cooperación Alemana GIZ, a través del proyecto MiTransporte. El presente estudio toma las 20 rutas y ramales que presentan las mejores ventajas para ser electrificadas, según los resultados de las modelaciones de la primera fase[1]. La finalidad es determinar cuáles de éstas poseen mayor rentabilidad para ser operados con buses eléctricos (TCO de flota eléctrica menor que el TCO de flota diésel). Para el desarrollo de la actividad, se utilizó la información proporcionada por ARESEP y los datos que posee el CTP, quien levanta la información sobre el trazado de referencia de cada una de las rutas, con la identificación de sus paradas. Se señala que, con la finalidad de contar con datos fiables, se realizó un proceso de validación sobre los datos de entrada a nivel ramal sobre el número de buses y kilometraje recorrido, como, ya que desde el año 2000 se han hecho trabajos en función de mejorar la configuración del transporte público, que continúa presentando una estructura radial, con posibles transformaciones que podrían no representar la realidad.

Equipo CMM:	Lourdes Becerra Marcela Castillo Sebastián Galarza	Miguel Ibáñez Gianni López Ariel Núñez
Coordinación PNUMA:	Esteban Bermúdez Forn Arturo Steinvorth Álvarez	Fabrício Pietrobelli
Revisión CRUSA	Juan Guillermo Murillo	Carolina Rodríguez
Fecha de entrega:	Enero 2021	

[1] El top 20 de las rutas y ramales evaluados en este documento, puede no coincidir con el reportado en el producto D4 (*Technical report on route selection based on energy consumption for initial deployment of battery electric buses and potencial scale up*) del presente proyecto. Esto se debe a que hubo una segunda versión ampliada del análisis de rutas del producto D4, que se realizó de manera simultánea con el presente análisis de costos.

Contenidos

Presentación 2

Contenidos 3

1 Antecedentes 1

1.1 Transporte público de autobuses del AMSJ 1

1.2 Resultados de la modelación de buses eléctricos de batería en rutas de la AMSJ 2

2 Enfoque metodológico 5

2.1 Obtención de datos 7

2.2 Análisis de sensibilidad 10

3 Resultados 12

3.1 Discusión de resultados 1

4 Análisis de sensibilidad 3

4.1 Escenario comparativo de tarifas eléctricas 3

4.2 Escenario COVID-19 y su disminución en el uso de transporte público 5

4.3 Escenario tendencias del sector energético en Costa Rica 8

4.4 Escenarios reducción de la vida útil a 10 años 10

4.5 Discusión del análisis de sensibilidad 12

5 Conclusiones 15

6 Anexos 17

6.1 Descripción de escenarios evaluados en la modelación 17

6.2 Autonomías de carga por ramales 18

Índice de Figuras

Figura 1. Lado izquierdo: Rutas y ramales modelados por el proyecto "Leapfrogging to electric buses in Costa Rica". Lado derecho: Top 20 de ramales potenciales a electrificar, según los resultados del mismo estudio 1

Figura 2. Distribución de antigüedad de autobuses en Costa Rica (Aresep) 2018-2019 2

Figura 3. Construcción del Costo total de propiedad de los buses modelados operando en AMSJ 5

Figura 4. Costo total de propiedad por bus y por ramal ($ USD) 14

Figura 5. Costo total de propiedad por kilómetro y por ramal ($ USD) 15

Figura 6. Comparación de escenarios de TCO promedio – escenario de referencia contra el de tarifa comercial ($ Millones de USD) 5

Figura 7. Comparación de escenarios de TCO promedio – escenario de referencia contra disminución de la oferta por COVID ($ Millones de USD) 8

Figura 8. Comparación de escenarios de TCO promedio – escenario de referencia contra tendencias en el sector energético ($ Millones de USD) 10

Figura 9. Escenarios y parámetros que más influyen en el TCO según el presente estudio . 12

Figura 10. Sensibilidad del TCO de la flota a diésel evaluada en la AMSJ 13

Figura 11. Comparación del TCO promedio por kilómetro de la flota evaluada en el AMSJ. 14

Índice de tablas

Tabla 1. Características de buses eléctricos modelados en el proyecto “Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica” 3

Tabla 2. Promedios de autonomías por carga de los buses A y B bajo cuatro condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de aire acondicionado 3

Tabla 3. Tasa de consumo promedio de los Buses 1 y 2 bajo cuatro condiciones de carga de pasajeros y funcionamiento de aire acondicionado. 4

Tabla 4. Datos de operación (buses y kilómetros promedio por día) validados por ramal 8

Tabla 5. Datos Información clave para construir el escenario de referencia de buses diésel por ruta, valores promedio (Fuente: Elaboración propia con información de ARESEP y CTP). 11

Tabla 6. Distribución del costo total de propiedad a 15 años de los 20 ramales evaluados ($ USD) 13

Tabla 7. Comparación del costo promedio de los ramales evaluados por kilómetro y por bus ($ USD) 13

Tabla 8. Comparación del costo total de propiedad a 15 años, escenario con tarifa comercial (T-CO) ($ USD). 4

Tabla 9. Comparación del costo total de propiedad a 15 años, escenario COVID-19 disminución de la oferta en 30% ($ USD) 6

Tabla 10. Comparación del Costo total de propiedad a 15 años, escenario COVID-19 disminución de la oferta en 20% ($ USD) 7

Tabla 11. Tarifas consideradas para construir el escenario de tendencia energética 9

Tabla 12. Comparación del costo total de propiedad a 15 años – escenario de tendencias del sector energético ($ USD) 9

Tabla 13. Costo total de propiedad, considerando una vida útil a 10 años ($ USD) 11

1 Antecedentes

1.1 Transporte público de autobuses del AMSJ

El sistema de transporte de autobuses del Área Metropolitana de San José (AMSJ) lo componen cerca de 40 concesiones quienes operan aproximadamente 250 rutas y transportan a 1.160.000 pasajeros al día[2]. Para el año 2021, se espera que hayan vencido el periodo de operación de todas las concesiones entregadas por el CTP (duración de 7 años), y que, para entonces, estén preparadas las bases del nuevo proceso de licitación, definiendo las condiciones de los nuevos operadores.

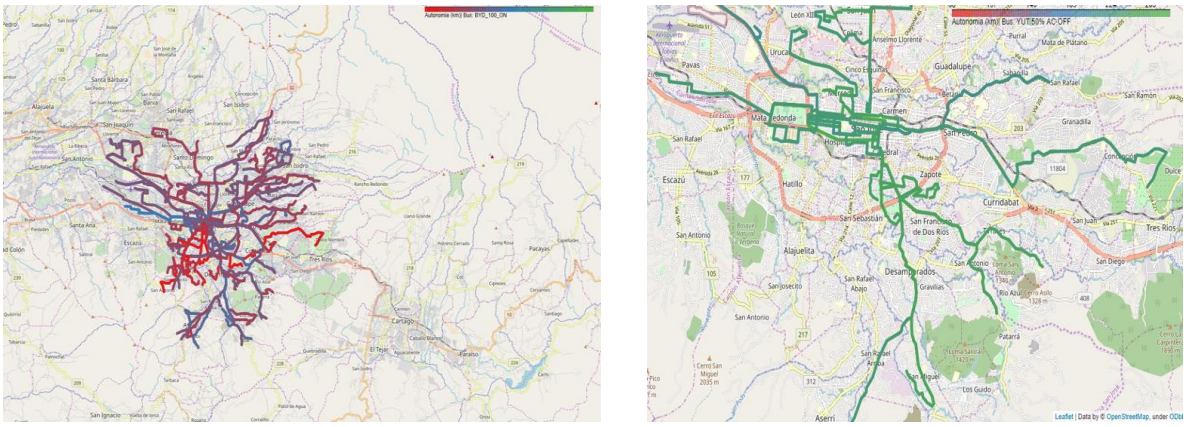

Figura 1. Lado izquierdo: Rutas y ramales modelados por el proyecto "Leapfrogging to electric buses in Costa Rica". Lado derecho: Top 20 de ramales potenciales a electrificar, según los resultados del mismo estudio

Fuente: Elaboración propia

El AMSJ tiene una superficie de 2.044 km^2, con una densidad poblacional de menos de 4.000 habitantes por km^2 en algunos de sus distritos. Este último indicador ha presentado una tendencia decreciente durante los últimos años; esto está relacionado con lo complejo que es lidiar con las dinámicas de crecimiento y dispersión urbanas[3]. Resultado de ello, el sistema de autobuses presenta una organización radial, donde casi un tercio de los recorridos (439 según el MOPT) tienen salida desde el centro de la San José[4], provocando retrasos por la congestión que se presenta en el centro de la ciudad afectando directamente a los cerca de 1.200.000 pasajeros diarios que utilizan el sistema de autobuses.

Con relación a las características de los buses que operan en el sistema de transporte público, a través de los contratos del concesionario con el Consejo de Transporte Público (CTP) se les exige mínimo Euro III. Así mismo, según el Decreto Nº 29743-MOPT, la antigüedad máxima con la que puede circular

[2] Información proporcionada vía directa por ARESEP y CTP.
[3] Plan integral de movilidad urbana sostenible para el Área Metropolitana de San José, Costa Rica. AC&A y Gensler, 2017.
[4] Clasificación de las rutas de la red de transporte público modalidad autobús de Costa Rica, Quirós, Agüero, 2018.

un bus es de 15 años. En la siguiente figura se puede observar la distribución de edad de toda la flota de buses del país, siendo 7 la edad promedio.

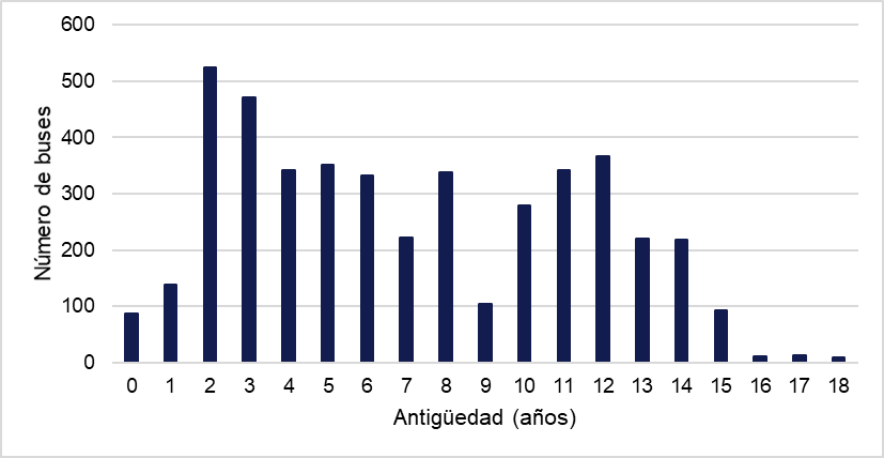

Figura 2. Distribución de antigüedad de autobuses en Costa Rica (Aresep) 2018-2019

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que en San José existen 302 operadores, pero sólo el 7% cuenta con flotas mayores a 50 buses – lo que representa un sistema "disperso", compuesto por múltiples actores responsables de pequeñas flotas.

1.2 Resultados de la modelación de buses eléctricos de batería en rutas de la AMSJ

Se realizaron modelaciones para determinar el consumo de energía y autonomía de dos distintas configuraciones de buses eléctricos, Bus 1 y Bus 2, bajo dos diferentes condiciones de carga de pasajeros y dos diferentes condiciones de funcionamiento del aire acondicionado, operando en las distintas rutas del sistema de transporte público del AMSJ. Fueron analizadas, por lo tanto, cuatro escenarios de operación; los dos primeros con un 50% de carga de pasajeros con y sin el funcionamiento del aire acondicionado, y los últimos con el 100% de carga de pasajeros igualmente con y sin el aire acondicionado encendido (ver anexo 6.1). Se señala que el Bus 1 coincide con la topología de bus eléctrico que se empleará en el piloto del proyecto MiTransporte de la Cooperación Alemana GIZ, donado por el Ministerio de Ambiente de Alemania (BMU) para circular en San José, cuya finalidad es que las autoridades prueben, entiendan y evalúen la tecnología[5].

[5] Los buses eléctricos donados por el gobierno de Alemania están aquí. GIZ, diciembre 2020. https://www.youtube.com/watch?fbclid=IwAR2OnWM92LhKoG-MYQfbWJAyPzeTXrV8gIAE_KR5PljNV_st3tKW5o-33UA&v=xtZZNQGd_ic&feature=youtu.be&ab_channel=GIZ_CR.

Tabla 1. Características de buses eléctricos modelados en el proyecto "Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica"

Bus	Bus 1	Bus 2
Tipo de batería	LFP	LFP
Tipo de carga	Carga en depósito	Carga en depósito
Potencia nominal (kW)	110x2	215
Potencia máxima [kW]	150x2	350
Pack de baterías (kWh)	277	324
Tipo de cargador	AC	DC
Potencia de cargador (kW)	80	150
Tiempo de carga (0 a 100% SOC) min	285	90
Longitud [m]	12	12
Peso bruto vehicular [kg]	18.128	18.950
Peso en vacío [kg]	12.863	13.350
Asientos	30	27
Capacidad de pasajeros	81	87

Fuente: Elaboración propia

1.2.1 Consumo de energía y autonomía de buses eléctricos

Se analizaron 152 rutas, en las cuales se determinó la autonomía (en kilómetros) de los dos buses virtuales evaluados, circulando en los ramales con las condiciones de operación actual. Se observó que el Bus 2 tiene en promedio de un 14% más de autonomía que el Bus 1. Lo anterior está relacionado con que el Bus 2 tiene una mayor capacidad de almacenamiento en las baterías. Sin embargo, esto también significa un peso mayor de la unidad de transporte, lo que incrementaría el consumo de energía por kilómetro y los costos de capital.

Tabla 2. Promedios de autonomías por carga de los buses A y B bajo cuatro condiciones diferentes de carga de pasajeros y funcionamiento de aire acondicionado

Escenario	Autonomía Promedio (km)		Diferencia
	Bus 1	Bus 2	
50% de carga de pasajeros sin AC	173	198	13%
50% de carga de pasajeros con AC	140	162	14%
100% de carga de pasajeros sin AC	132	154	14%
100% de carga de pasajeros con AC	125	147	15%

Fuente: Elaboración propia

El Bus 1, bajo la condición de 50% de carga de pasajeros y sin aire acondicionado tiene una autonomía promedio por carga cercana a 173 km (Bus 1). Si se compara con el escenario más extremo (100% carga y AC ON), significa que la autonomía del Bus 1 disminuye en promedio un 28%, y un 26% en el Bus 2 al aumentar el peso y utilizar aire acondicionado durante todo el recorrido. Para el presente estudio, se utilizarán los resultados del Bus 1, dado que es el más asequible dadas las condiciones del transporte público del AMSJ (kilometraje moderado, distancias cortas, infraestructura), además de coincidir con la topología de bus eléctrico que se empleará en el proyecto piloto de la iniciativa MiTransporte, de la Cooperación Alemana GIZ, que se llevará a cabo en San José próximamente.[6]

Tabla 3. Tasa de consumo promedio de los Buses 1 y 2 bajo cuatro condiciones de carga de pasajeros y funcionamiento de aire acondicionado.

Escenario	Tasa de consumo (kWh/km)	
	Bus 1	Bus 2
50% de carga de pasajeros sin AC	1,27	1,31
50% de carga de pasajeros con AC	1,61	1,63
100% de carga de pasajeros sin AC	1,72	1,74
100% de carga de pasajeros con AC	1,77	1,78

Fuente: Elaboración propia

[6] Los buses eléctricos donados por el gobierno de Alemania están aquí. GIZ, diciembre 2020. https://www.youtube.com/watch?fbclid=IwAR2OnWM92LhKoG-MYQfbWJAyPzeTXrV8gIAE_KR5PljNV_st3tKW5o-33UA&v=xtZZNQGd_ic&feature=youtu.be&ab_channel=GIZ_CR.

2 Enfoque metodológico

El Costo Total de Propiedad (TCO, por sus siglas en inglés) nos permite conocer el nivel costos que tendrá un bus a lo largo de su vida útil. A través del Decreto Nº 29743-MOPT, la autoridad de Costa Rica ha dispuesto una antigüedad máxima de 15 años para poder circular. El presente análisis de TCO, captura la sumatoria de las inversiones en bienes de capital (CAPEX), así como los gastos operativos (OPEX) durante la vida útil de la flota de buses. En este sentido, el presente análisis de TCO evalúa las flotas de 20 rutas y ramales de transporte público de AMSJ, según los resultados de la modelación obtenidos en la primera versión del estudio de "*Elección de rutas basado en consumo de energía para el despliegue inicial de buses y su potencial de escalamiento, San José, Costa Rica*" [7]. Vale la pena destacar que el presente análisis de TCO compara la flota actual de buses de combustión interna con el supuesto de que ésta misma flota opere con buses eléctricos, bajo las mismas condiciones de operación.

El CAPEX para ambas tecnologías incluye el costo de adquisición, y, en el caso de los eléctricos, adicionalmente, se consideran los costos de la infraestructura de recarga asociada, así como una batería adicional – dado que la vida útil de las baterías tienda a ser menor a la antigüedad máxima asumida de 15 años. En el OPEX se incluyen los costos de la energía y/o el combustible, componentes accesorios, salarios y los costos asociados al mantenimiento. Se aclara que se consideró un costo residual del bus eléctrico y no se consideró adicionar un costo asociado a equipos y buses de respaldo para cubrir la demanda en caso de que algún bus presente alguna falla. Lo cual se recomienda considerar al momento del diseño del proyecto de adopción.

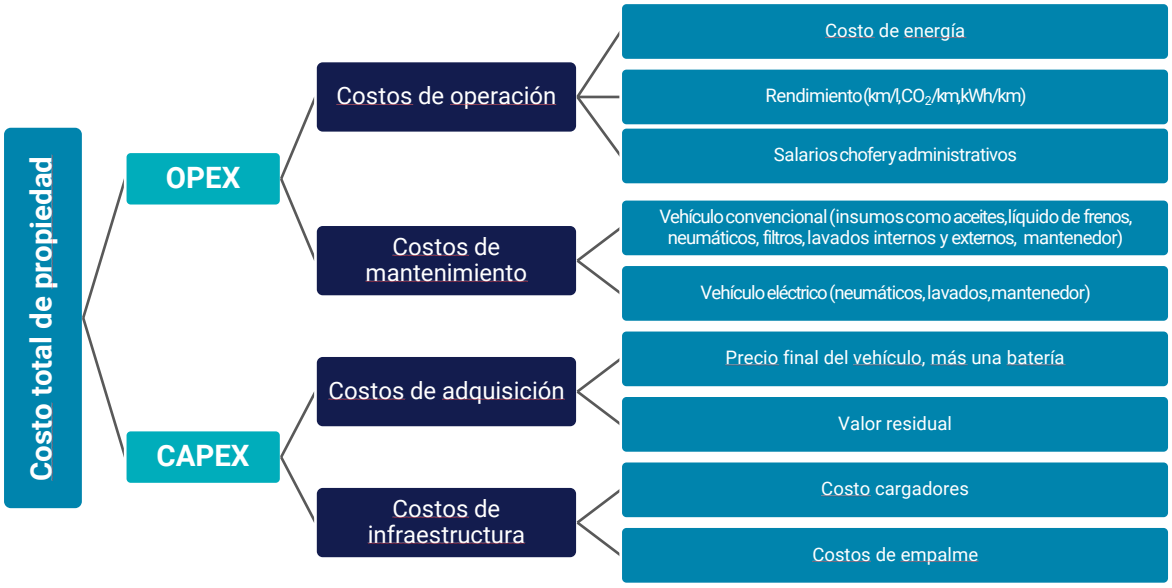

Figura 3. Construcción del Costo total de propiedad de los buses modelados operando en AMSJ

Fuente: Elaboración propia

[7] Estudio realizado en el marco del proyecto "Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica" ("Leapfrogging to e-buses in Costa Rica" en inglés), financiado por la Fundación Costa Rica Estados Unidos para la Cooperación (CRUSA) en su versión ampliada.

La vida útil de 15 años se mantuvo constante para ambos tipos de flotas diésel y eléctrica, con la finalidad de contar con una comparación coherente para el período estudiado. Sin embargo, se estima que la vida útil de los buses diésel es mucho menor a la de los eléctricos. Lo anterior, debido al deterioro del motor de combustión, que es más crítico que el de los eléctricos, causando afectaciones ambientales y a la salud que llevan a las autoridades a retirarlos de circulación.

El análisis de TCO se realizó por ramal con el objetivo de que los operadores puedan contar con una referencia de los costos a enfrentar en caso de la electrificación completa de una ruta de transporte público. Además, aproximadamente el 10% de los operadores cuentan con un bus y el 7% cuenta con flotas mayores a las 50 unidades. Este estudio representa una oportunidad de proporcionar información que incentive tanto a pequeños como medianos operadores a renovar sus unidades y a buscar alianzas para abatir los costos de infraestructura.

Lo anterior tiene varias razones. Primero, dada las exigencias ambientales y regulatorias a las cuales se enfrentarán los operadores en los años subsiguientes; es importante comenzar un proceso de planificación coherente para la electrificación de servicios[8]. En el año 2018, entró en vigor la Ley N° 9518 sobre incentivos y promoción para el transporte eléctrico. En su artículo número 28, se establece que "el 5% de las renovaciones bianuales de las flotas de autobuses debieran ser eléctricos, correspondiente a la incorporación de aproximadamente 200 buses cero emisiones cada dos años a nivel nacional".

Segundo, permite valorizar los activos de manera sistémica y conocer los niveles de inversión. Con base en lo anterior, pueden evaluarse distintos modelos de financiamiento y desarrollar las bases para elaborar acuerdos público-privados sobre los primeros pilotos.

Tercero, y muy asociado al punto precedente, las inversiones asociadas con las operaciones de buses eléctricos generan economías de escala. En particular, las inversiones de adecuación de infraestructura eléctrica, estaciones de carga y depósitos al igual que mejoramientos en gestión de operación tienen menores costos marginales a mayor escala de intervención.

Con base en la nomenclatura utilizada por las autoridades del Transporte Público en Costa Rica, las rutas serán representadas por números, los ramales por letras y el sentido de estas: saliendo de San José será 1-2 y desde otros distritos hacia el centro de la capital como 2-1.

Ejemplo: Línea 13 ramal A y B.

13A 1-2 San José - Sabana - Estadio Sentido Horario

13A 2-1 Estadio Sentido Horario –Sabana-San José

13B 1-2 San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle

13B 2-1 Estadio Sentido Horario por La Salle-Sabana San José

[8] El artículo 28 de la Ley 9518 de "Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico" de Costa Rica establece que "la flota vehicular de autobuses concesionado en el país realice, de forma paulatina, la sustitución a vehículos eléctricos, con previa autorización técnica y legal del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), de conformidad con viabilidad financiera y cuando las condiciones de las rutas de autobuses lo permitan. Para ello, el Plan Nacional de Transporte Eléctrico deberá proyectar el reemplazo de la flota de autobuses, al menos cada dos años, con una meta dentro de este período no menor del cinco por ciento (5%)".

2.1 Obtención de datos

La información utilizada para el presente reporte proviene de dos fuentes de información principales:

1. Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), a través de su página web se pudo obtener la información de las unidades de autobuses y la información relacionada con los operadores del transporte público.

2. Consejo de Transporte Público (CTP), quien facilitó la información de las rutas y ramales.

2.1.1 Validación de datos de entrada

La estructura del transporte público en el AMSJ presenta una organización radial, donde casi un tercio de las rutas (439 según el Ministerio de Obras Públicas y Transporte) tiene recorridos que parten[9] del centro de la ciudad, provocando retrasos y congestión en esta área. La congestión impacta en las frecuencias de los buses, además, modifica la manera de consumir energía (resultado de las aceleraciones y desaceleraciones del bus). Por tanto, se producen externalidades como el ruido, la contaminación local, los daños a la salud y el tiempo perdido en el tráfico. En este sentido, los datos de intensidad de uso de los ramales (número de buses y kilometraje) resultan ser cruciales para la elaboración de este análisis. Según la literatura, los parámetros más sensibles en un TCO comparativo son el kilometraje y los años de vida útil de los buses[10].

Con base en lo anterior, se realizó una validación de los datos sobre la operación de los ramales a evaluar. En un principio, los datos se encontraban agregados por las rutas y los ramales que la componen, además, algunos diferían en kilometraje y número de buses entre los datos proporcionados por ARESEP y CTP. Para ello, fue necesario solicitar este proceso de validación a ambos actores.

[9] Clasificación de las rutas de la red de transporte público modalidad autobús de Costa Rica, Quirós, Agüero, 2018.
[10] A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities, Nurhadia, Boréna, Nya, 2014.

Tabla 4. Datos de operación (buses y kilómetros promedio por día) validados por ramal

Ruta / Ramal	Cantidad de buses por ruta / ramal	Kilómetros promedio diario
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	16	1.413
58. San José - San Francisco	23	3.270
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	16	1.297
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	16	1.297
16. San José - Barrio México	11	923
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	12	1.774
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	12	1.673
7A. San José - Cementerio - Sabana	12	921
50I. San José - Sabanilla	14	1.429
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	13	1.278
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	8	556
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	5	553
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	6	815
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	6	811
14. San José - Pavas Zona 1	6	1.248
20F. San José - La Florida por Cruce	10	904
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	3	583
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	4	695
65C. San José - Quesada Durán	6	703
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	5	604

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Escenario de referencia

Para construir un escenario base, se utilizó la información de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP), ya que tiene una estructura de costos definida basado en un modelo de fijación tarifaria de las rutas del servicio de transporte público. A partir de las características de cada ramal, principalmente el número de buses, los kilómetros recorridos al día y el rendimiento energético, se estimaron los costos de cada parámetro que componen los costos de adquisición, operación y mantenimiento de un año (considerando 360 días hábiles) para ser llevados a valor futuro.

En la tabla 5 se describen los costos utilizados para construir el escenario de referencia. El costo de adquisición es el dato de compra de buses urbanos informado por ARESEP, de las compras realizadas en el año 2016, que se utiliza para representar el costo de los buses con la antigüedad más numerosa que existen actualmente en el sistema (ver Figura 2, de distribución de antigüedad de los buses de la flota de AMSJ), ya que se desconoce a detalle qué modelos o la edad de la flota que compone los

ramales. El costo del bus eléctrico está basado en los modelos BYD importados a la región, específicamente en Chile[11]. Adicionalmente en el CAPEX se incluyeron los costos de infraestructura, la compra de una batería adicional y la consideración de un valor residual asociada al vehículo incluida la batería.

Los costos operacionales incluyen la cantidad de diésel consumido por los ramales y los sueldos anuales de dos turnos diarios para el chofer y de un turno de personal administrativo. Se consideró un costo promedio del diésel de los últimos 10 años (¢543 Colones), dado que el precio del diésel fluctúa según los mercados internacionales del petróleo y presenta variaciones en respuesta a fenómenos ajenos al país. Ejemplo de ello son las fluctuaciones en los meses de la pandemia COVID-19. En marzo 2020, ARESEP reportó un pico máximo histórico en el precio del diésel (¢928 Colones) y un mes después, registró una bajada abrupta a menos de la mitad (¢399 Colones)[12]. Se utilizaron los datos de tendencia de la ARESEP, los cuales incluyen la tributación indirecta en el precio final[13], cuyo objetivo es el de capturar los efectos locales de la economía en el país. Por último, se optó por utilizar una tarifa promedio de combustible de (¢ 543 colones por litro) con la finalidad de disminuir la incertidumbre de la volatilidad en los precios del diésel. En cambio, el costo de la electricidad es un parámetro que depende de la composición de la malla energética del país, para lo cual se usó la tarifa promocional (T-BE, en el año de 2020) de ¢57,08 por kWh fijada por ARESEP para el suministro de energía eléctrica en los centros de recarga para autobuses del Transporte Público[14,15].

En cuanto a los costos de mantenimiento, la ARESEP tiene establecida la frecuencia y los indicadores de estas actividades, a través de la "Metodología para fijación ordinaria de tarifas para el servicio de transporte remunerado de personas, modalidad autobús", dictada mediante la Resolución RJD 035-2016, lo cual permitió la construcción de una estructura de costos desagregada por:

- Cantidad de aceite hidráulico consumido (l)
- Cantidad de aceite de motor consumido (l)
- Cantidad de aceite de caja de cambios consumido (l)
- Cantidad de grasa consumido (kg)
- Líquido para frenos (l)
- Número de llantas
- Número de filtros por ruta
- Baterías de ácido plomo
- Cantidad de lavados de motor chasis
- Cantidad de lavados externos de buses
- Cantidad de lavados internos de buses

El cuanto al rendimiento del combustible (expresado en l/km o kWh/km), en el caso de los autobuses a diésel, se utilizó el parámetro definido por ARESEP para los autobuses de transporte público (0,47

[11] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf.
[12] Tarifa de combustibles, Aresep 2020. https://aresep.go.cr/transparencia/datos-abiertos/tarifas-de-combustibles.
[13] ARESEP: impacto IVA en servicios públicos, Noviembre 2020, https://aresep.go.cr/noticias/2756-aresep-impacto-iva-en-servicios-publicos.
[14] Resolución RE-0112-IE-2020.
[15] ARESEP fija tarifa promocional de recarga en buses eléctricos, Aresep 2020. https://aresep.go.cr/noticias/3125-aresep-fija-tarifa-promocional-de-recarga-en-buses-electricos.

l/km). Para los buses eléctricos se utilizó un rendimiento promedio de 1,31 kWh/km, resultado de la modelación del Bus 2, en el escenario de 50% carga de pasajeros y aire acondicionado apagado (ver sección 1.2), cuya finalidad fue realizar una estimación optimista sobre las prestaciones del servicio. Así mismo, dadas las autonomías, se asume una sola carga de los buses durante la noche (conocida como carga nocturna en depósito). Sin embargo, esto último tiene que ser evaluado con mayor precisión por ruta o ramal y depende de la configuración de frecuencias de la ruta y el acceso a infraestructura de recarga.

Con la finalidad de estimar el valor del dinero a futuro, se aplicó una tasa de descuento de 11% y no se consideraron costos o incentivos sociales y/o regulatorios[16] (ver Tabla 5). Por último, dado la metodología del estudio de un TCO, no se considera el flujo de dinero entrante por el cobro del pasaje, puesto que se desconoce el número de pasajeros a detalle por ramal. Todos los resultados se presentan en dólares americanos, y se utilizó una tasa de cambio de: $1 USD = ¢603 colones, cómo se muestra en la tabla 5.

2.2 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para el costo total de propiedad (TCO) con el fin de reducir la incertidumbre de los resultados. Se identificación los factores de interés que más podrían afectar los costos de las flotas, principalmente la de buses eléctricos. En el capítulo 5 se describen los supuestos utilizados, así como los resultados. Sin embargo, se señalan que los escenarios evaluados fueron:

- Una reducción de la vida útil de los buses a 10 años.
- Adopción de la tarifa comercial (T-CO) para la recarga en las terminales de autobuses eléctricos.
- Tendencias del sector energético, basado en la evolución de los precios de la energía (tanto diésel como electricidad) de los últimos 10 años.
- Reducción de la oferta debido a la crisis por la pandemia de COVID-19.

[16] Proyecto Modelos de negocio y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Costa Rica, Banco Interamericano de Desarrollo, BID - Basel Agency for Sustainable Energy, BASE, 2020.

Tabla 5. Datos Información clave para construir el escenario de referencia de buses diésel por ruta, valores promedio (Fuente: Elaboración propia con información de ARESEP y CTP).

Concepto	Unidad	Escenario base		Fuente
Datos generales				
Vida útil del bus	años	15		
Recorrido anual (incluido 10% vacío)	km/año (promedio, max-min)	1.178 (3.270 - 553)		Aresep / CMM
Recorrido diario	km/día (promedio, max-min)	61,25(209,21 - 9,2)		Aresep / CMM
Número de buses	# (promedio, max-min)	11 (23-3)	11 (23-3)	Aresep / CMM
Tecnología	NA	Diésel	Eléctrico	
Tipo de recarga	NA	NA	Carga en depósito	
Porcentaje de recarga nocturna	%	NA	80	CMM
CAPEX				
Costo del bus	$ USD	120.000	260.000	Aresep; DTPM Transantiago
Capacidad batería (BYD K9FE)	kWh	NA	272	BYD
Costo del cargador lento por bus (AC BYD)	$ USD	NA	4.000	BYD
Costo infraestructura (empalme)	$ USD	NA	100 mil / 450 kW	Dhemax
Costo batería adicional (menos 30% bajada de costo)	$ USD	NA	28.000	BYD
Buses por cargador lento	#	NA	2	
OPEX				
Eficiencia del bus	l/km ; kWh/km	0,47	1,32	Aresep; modelaciones CMM
Costo del Combustible diésel / electricidad	₡/l ; USD	543 ; 0,90	57,08 ; 0,095	Aresep
Suma costos de operar	**$ USD (promedio, max-min)**	**200.274 (527.256 - 101.849)**	**74.054 (176.947 - 42.625)**	Aresep; ICE
Diésel / electricidad	$ USD (promedio, max-min)	132.314 (573.474 - 4.198)	41.218 (178956-1.310)	Aresep
Salario chofer	$ USD	23.373	23.373	Aresep
Salario administrativo	$ USD	5.965	5.965	Aresep
Suma costos de mantenimiento	**$ USD (promedio, max-min)**	**64.420 (139.340 - 39.112)**	**35.985 (76.859 - 22.208)**	Aresep / CMM
Aceite de motor	$ USD (promedio, max-min)	7.634 (21.188 - 3.585)	NA	Aresep / CMM
Aceite hidraúlico	$ USD (promedio, max-min)	424 (1.177 - 199)	NA	Aresep / CMM
Aceite caja de cambios	$ USD (promedio, max-min)	814 (2.260 - 382)	NA	Aresep / CMM
Engrasado	$ USD (promedio, max-min)	373 (1.036 - 175)	NA	Aresep / CMM
Líquido de frenos	$ USD (promedio, max-min)	2.644 (7.337 - 1.241)	NA	Aresep / CMM
Llantas	$ USD (promedio, max-min)	16.854 (46.776 - 7.914)	16.854 (46.776 - 7.914)	Aresep / CMM
Baterías	$ USD (promedio, max-min)	5.993 (13110 - 2.850)	NA	Aresep / CMM
Filtros	$ USD (promedio, max-min)	1.928 (5.351 - 905)	NA	Aresep / CMM
Lavados de motor	$ USD (promedio, max-min)	2.019 (4.416 - 960)	NA	Aresep / CMM
Lavados externos e internos	$ USD (promedio, max-min)	9.223 (20.176 - 4.386)	9.223 (20.176 - 4.386)	Aresep / CMM
Salario mantenedor	$ USD	16.514	9.908	Aresep
Consideraciones				
Tasa de Descuento	%	11		
Tasa de Cambio	₡/USD	603		
Valor residual del bus	%	5		

3 Resultados

La comparación del análisis de TCO, entre dos tipos diferentes de flotas diésel *versus* eléctrica sugiere que los 20 ramales evaluados podrían ser rentables asumiendo las condiciones de operación actual con autobuses eléctricos para un periodo de 15 años. En promedio, la diferencia es de un 38% menos en el TCO de los buses eléctricos en comparación con sus pares a diésel. El rango de error estimado es de ±10% por lo que todos los ramales evaluados presentan resultados sobre esta diferencia. Se destaca el ramal "14. San José - Pavas Zona 1" que presenta una diferencia positiva del 48%, lo que sugiere que el costo de la compra y operación de un vehículo disminuye prácticamente a la mitad, asumiendo que éste es electrificado.

Tabla 6. Costo total de propiedad a 15 años de los 20 ramales evaluados ($ USD)

Costo total de propiedad a 15 años ($ USD)				
Ramal	Diésel	Eléctrico	Diferencia	Km anual
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	13.065.601	8.706.029	-33%	508.788
58. San José - San Francisco	25.687.580	14.418.257	-44%	1.177.114
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	12.084.056	8.202.559	-32%	466.920
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	12.084.056	8.202.559	-32%	466.920
16. San José - Barrio México	8.908.790	6.049.481	-32%	332.262
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	14.304.814	8.051.006	-44%	638.568
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	13.686.410	7.846.960	-43%	602.280
7A. San José - Cementerio - Sabana	9.071.084	6.324.106	-30%	331.452
50I. San José - Sabanilla	12.542.596	7.911.704	-37%	514.494
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	11.441.133	7.327.194	-36%	460.193
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	6.129.890	4.469.338	-27%	200.196
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	5.449.844	3.491.923	-36%	199.156
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	7.232.550	4.301.213	-41%	293.432
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	7.207.471	4.292.938	-40%	291.960
14. San José - Pavas Zona 1	9.890.287	5.178.149	-48%	449.388
20F. San José - La Florida por Cruce	8.484.865	5.598.726	-34%	325.584
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	5.282.741	2.994.634	-43%	210.017
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	6.144.849	3.500.167	-43%	250.272
65C. San José - Quesada Durán	6.542.810	4.073.629	-38%	252.958
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	5.760.579	3.594.452	-38%	217.390

Fuente: Elaboración propia

El orden de magnitud promedio del TCO asumiendo una flota diésel es de $10.050.100 USD, mientras que el de una flota equivalente eléctrica ronda los $ 6.226.751 USD. Se señala que los ramales evaluados presentan características muy distintas entre sí. El TCO de las flotas de diésel en algunas rutas llega a alcanzar cerca de los $25 millones de USD, mientras que otras flotas apenas alcanzan los $ 5,4 millones de USD. De la misma manera, el ramal con un TCO de buses eléctricos más elevado llega a los $ 14 millones de USD, y el más bajo es $ 3 millones de USD. Esto se debe, principalmente, a las variaciones en la configuración del sistema y la relación buses-kilometraje de los.

Tabla 6. Distribución del costo total de propiedad a 15 años de los 20 ramales evaluados ($ USD)

Distribución de los TCO evaluados en el AMSJ						
Ramal	Adquisición		Operación		Mantenimiento	
	Diésel	Eléctrico	Diésel	Eléctrico	Diésel	Eléctrico
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	15%	46%	64%	37%	21%	17%
58. San José - San Francisco	11%	39%	71%	42%	19%	18%
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	16%	49%	62%	34%	22%	18%
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	16%	49%	62%	34%	22%	18%
16. San José - Barrio México	15%	45%	63%	36%	23%	19%
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	10%	37%	70%	43%	20%	20%
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	10%	38%	69%	43%	20%	19%
7A. San José - Cementerio - Sabana	16%	47%	61%	34%	23%	18%
50I. San José - Sabanilla	13%	44%	66%	37%	21%	19%
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	14%	44%	65%	37%	21%	19%
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	16%	45%	60%	36%	25%	19%
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	11%	36%	64%	42%	25%	22%
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	10%	35%	67%	44%	23%	21%
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	10%	35%	67%	43%	23%	21%
14. San José - Pavas Zona 1	7%	29%	72%	49%	20%	22%
20F. San José - La Florida por Cruce	14%	45%	63%	36%	23%	19%
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	7%	25%	69%	51%	24%	24%
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	8%	29%	69%	48%	23%	23%
65C. San José - Quesada Durán	11%	37%	66%	42%	23%	21%
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	10%	35%	65%	43%	24%	22%

Fuente: Elaboración propia

Para hacer comparaciones, se realizó una ponderación de TCO por kilómetro y por número de buses, mismas que se presentan en las figuras 4 y 5. Según el rendimiento modelado, todos los ramales pueden cubrir su recorrido sin problema con una sola carga de batería. No obstante, los ramales a) "14. San José - Pavas Zona 1", justo el ramal con mayor rendimiento en costos; b) "10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista" y c) "2-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima" deben tomar en cuenta una estrategia de frecuencias y gestión de carga para no perder continuidad en el servicio, ya que sus autonomías se encuentran muy cercanas al límite de la batería cuando esta desciende hasta un 20% de carga, momento en el cual se recomienda realizar la recarga.

Tabla 7. Comparación del costo promedio de los ramales evaluados por kilómetro y por bus ($ USD)

TCO promedio por bus ($ USD)		TCO promedio por kilómetro ($ USD)	
Diésel	Eléctrico	Diésel	Eléctrico
$ 1.070.891	$ 655.513	$ 1,7	$ 1,1

Fuente: Elaboración propia

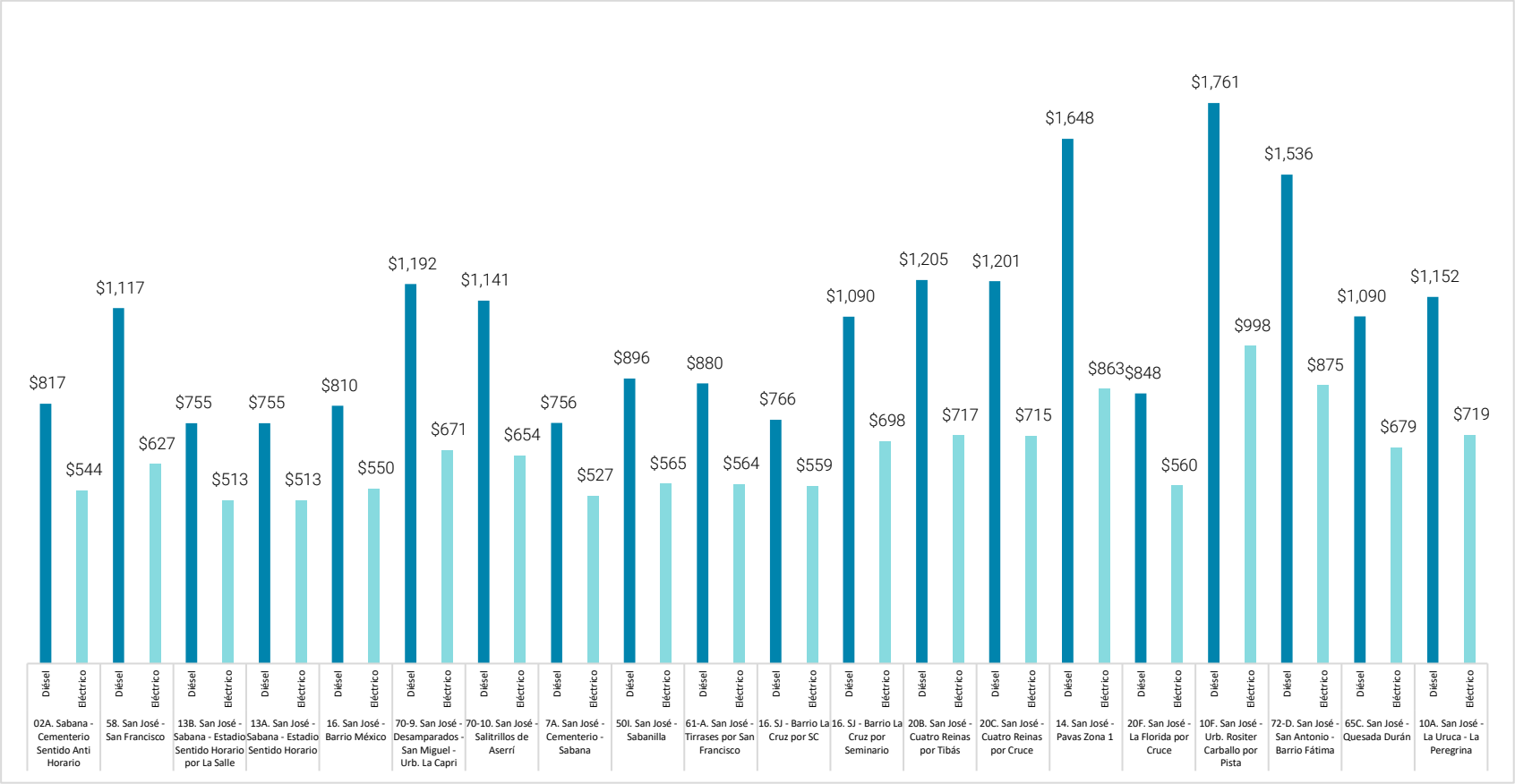

Figura 4. Costo total de propiedad por bus y por ramal ($ USD)

Fuente: Elaboración propia

El TCO promedio de las flotas de buses diésel se encuentra en alrededor de $ 1 millón de USD, mientras que el de las flotas de buses eléctricos se encuentran en alrededor de $655.000 USD. Es decir, el TCO de las flotas de buses de diésel es casi 40% más costosa que la de las flotas de buses eléctricos.

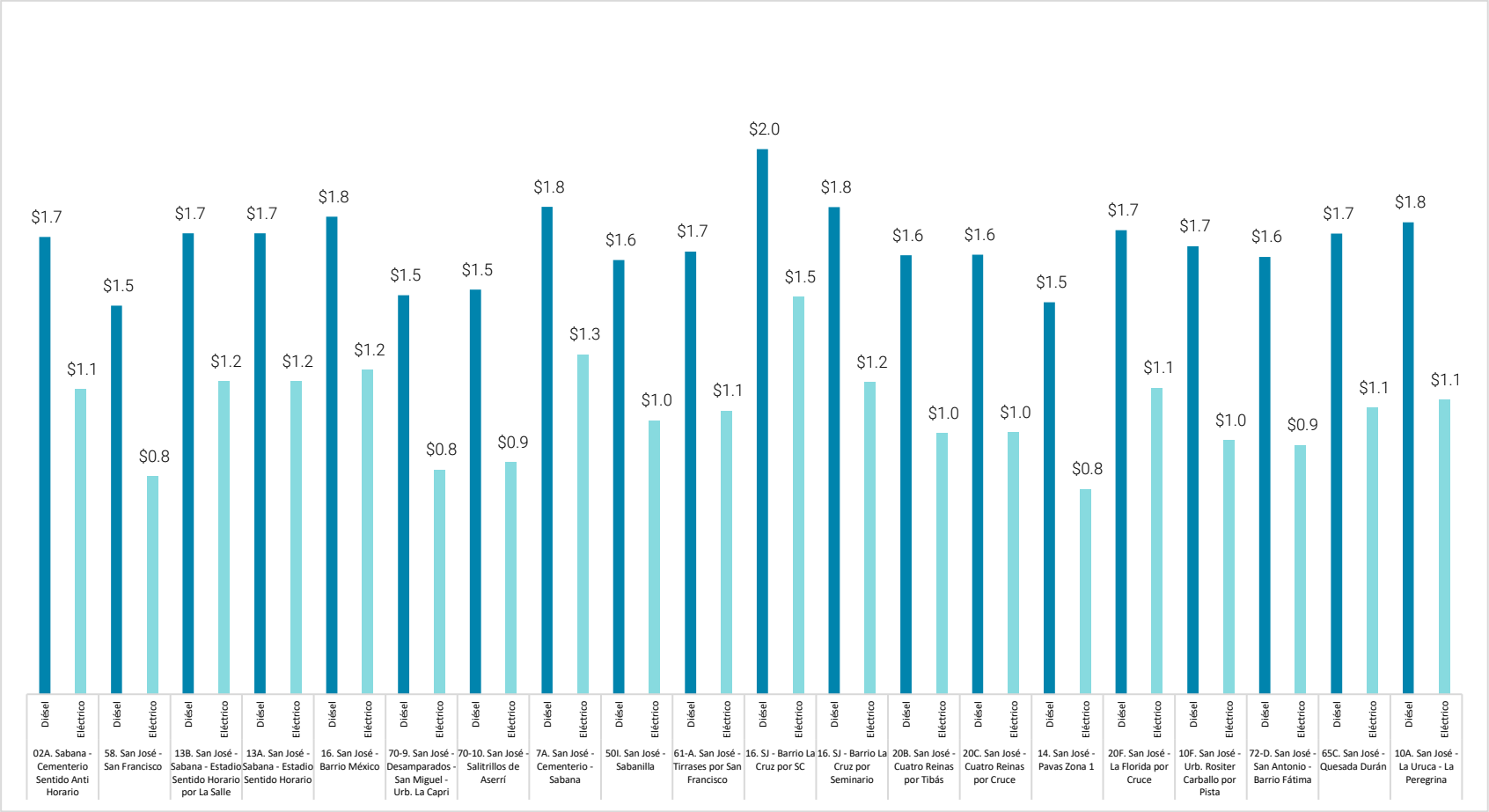

Figura 5. Costo total de propiedad por kilómetro y por ramal ($ USD)

Fuente: Elaboración propia

El costo promedio por kilómetro de los ramales evaluados es de $1,7 USD para buses diésel y $1,1 USD para los buses eléctricos.

3.1 Discusión de resultados

La movilidad eléctrica en el transporte público está experimentando cambios cada vez más acelerados en las áreas metropolitanas. En Costa Rica, desde el año 2000 se han realizado estudios técnicos que concluyen la necesidad de modernizar el sistema transporte en el AMSJ. A través la Ley N° 9518 sobre incentivos y promoción para el transporte eléctrico en su art. N° 28, se visualiza un recambio de flota del 5% cada dos años. Dado que los buses eléctricos son una tecnología nueva, los costos para su adquisición todavía son elevados para los operadores. El financiamiento para la compra de autobuses es la primera barrera que tendrán que abordar los operadores junto con las autoridades para potenciar una masificación de buses en la flota del AMSJ. En 2021, se espera que haya vencido el periodo de operación de todas las concesiones entregadas por el CTP (que tienen una duración de 7 años). Así mismo, se espera que, para entonces, estén preparadas las bases del nuevo proceso de licitación que definirá las condiciones de operación.

Según los resultados de este estudio, los costos de adquisición representan en promedio casi el 40% del TCO para los buses eléctricos y un 12% para los buses a diésel. En el AMSJ circulan autobuses con atrasos tecnológicos relevantes en sus operaciones. De acuerdo con el Anuario de Revisión Técnica 2018, la flota de autobuses de transporte público estaba conformada por aproximadamente 9.397 unidades, de las cuáles, un 25% se encuentra entre los 11-15 años de antigüedad y un 29% entre 6-10 años. Del total, sólo el 65% aprueba la revisión[17]. Tanto pequeños como grandes operadores podrían experimentar dificultades para acceder a un crédito y/o eliminar la primera barrera de la inversión. Existe un alto riesgo financiero asociado a los ingresos de un operador, porque dependen de las tarifas de transporte público muchas veces con esquemas tarifarios deficientes. Por este motivo, si se desea cumplir la meta estipulada por la Ley N° 9518 de renovar cada dos años el 5% de la flota, esto requerirá diseñar esquemas de financiamiento e inversión para el recambio de entre 115 y 120 buses aproximadamente. Esto representa una inversión aproximada de $30 millones de dólares cada dos años (CAPEX), según los resultados de este TCO y considerando el 5% de autobuses del segmento entre 11-15 años de antigüedad[18].

Al ser una tecnología relativamente nueva, no existen muchas referencias sobre los costos de operación del sistema – regularmente son datos reservados por los operadores como empresas prestadoras del servicio. El presente estudio estimó un costo promedio de operación por kilómetro de $1,1 USD para la flota con buses a diésel, mientras que para la eléctrica fue de $0,42 USD por km. A modo de comparación, METBUS, una de las empresas operadoras del Transantiago en Chile, reportó costos de operación de $0,86 y $0,10 USD por kilómetro para la flota con buses diésel y eléctricos respectivamente[19]. Dicho lo anterior, es importante destacar que las rutas en el AMSJ cuentan con un kilometraje promedio diario menor que el de Santiago (cerca de 1.137 km en AMSJ comparado a 5.500 km en Santiago).

El mantenimiento es el elemento principal para gestionar la vida útil de un autobús adecuadamente. Las autoridades han dispuesto 15 años como la antigüedad máxima con la que puede circular un bus

[17] Anuario de Revisión Técnica 2018RITEVE, 2019. https://www.rtv.co.cr/documentos/.
[18] Se usó como referencia el promedio de los costos de adquisición por autobús del presente estudio y el dato 25% de la flota 2018, reportada en el Anuario Estadístico 2019.
[19] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf.

en el AMSJ. Los resultados de este estudio indican que en promedio los ramales evaluados tienen un costo de mantenimiento promedio de $0,38 USD por kilómetro para el caso de los buses diésel y de $ 0,21 USD para los eléctricos. Sin embargo, es importante destacar que conforme los vehículos diésel van cumpliendo su vida útil, los costos de mantenimiento aumentan como resultado del avance en el deterioro, lo cual no fue posible capturar en el presente estudio. Este dato depende directamente de los operadores, pues son ellos quienes establecen la frecuencia y el tipo de las actividades de mantenimiento. Por ejemplo, la compañía METBUS, en Chile, acordó con la empresa BYD una tarifa fija de mantenimiento de $0,09 USD por km y le es transferida toda la responsabilidad a BYD por el mantenimiento[20]. Por su parte, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha estimado una cuota de mantenimiento de $0,12 por kilómetro igualmente para flotas circulando en el AMSJ cercano a los resultados del presente estudio[21].

En 2018, el 65% de los autobuses de transporte público que realizaron la revisión técnica vehicular aprobaron la inspección[22]. La ARESEP, ha publicado la "Metodología para la fijación ordinaria de tarifas para el servicio de transporte remunerado de personas, modalidad autobús", dictada mediante la Resolución RJD 035-2016, que establece una guía para las actividades de mantenimiento de los autobuses utilizada en este estudio.

[20] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf

[21] Proyecto Modelos de negocio y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Costa Rica, Banco Interamericano de Desarrollo, BID - Basel Agency for Sustainable Energy, BASE, 2020

[22] Anuario de Revisión Técnica 2018, RITEVE, 2019. https://www.rtv.co.cr/documentos/

4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad para el costo total de propiedad (TCO) ayuda a reducir la incertidumbre mediante la identificación de los factores de interés que más podrían afectar los costos de las flotas, principalmente la de buses eléctricos. A continuación, se muestran diferentes escenarios que suponen cambios en los parámetros.

4.1 Escenario comparativo de tarifas eléctricas

Como ya se mencionó, ARESEP aprobó una tarifa eléctrica promocional para el transporte público de ₡57,08 por kWh suscrita en la resolución RE-0112-IE-2020[23], misma que fue utilizada para construir el escenario de referencia. Este escenario evalúa un caso opuesto, que sería el uso de la Tarifa Comercial (T-CO) de baja tensión, que podría ser una de las aplicables, esta presenta una tarifa con diferenciación a partir de los 3.000 kWh (cobro binómico), donde se cobra por potencia ¢10.917,07 por cada kW ($18,06 USD), más la tarifa base según sea el caso: ¢110,37 ($0,18 USD) por kWh para consumos igual o menores a 3.000 kWh y ¢66,04 ($0,11 USD) por cada[24,25,26]. Este escenario refleja qué sucedería de no contar con una tarifa de energía eléctrica que compita con el precio del diésel.

Se señala que la ARESEP también fijó una Tarifa Eléctrica Industrial o de Media Tensión (T-MTb) de $0,10 USD por kWh. Sin embargo, para que pueda ser aplicada a las terminales de recarga se requiere un consumo mínimo de 1.000.000 kWh/mes, difícil de cumplir con flotas pequeñas, puesto que el consumo de los ramales evaluados se encuentra entre los 20.000-130.000 kWh/mes[27]. Lo anterior, podría resultar para flotas mayores o si se considera que varios operadores pudieran agruparse para compartir gastos de infraestructura y llegar al consumo mínimo requerido. La tarifa T-MTb es prácticamente similar a la preferencial T-BEB utilizada en el presente estudio y habilita la gestión racional de la demanda eléctrica por parte del consumidor final.

Se señala que existe en Costa Rica una tarifa estipulada para la recarga de vehículos eléctricos livianos de ¢182,72 kWh (más IVA y tributos), misma que fue diseñada para los centros de carga pública rápida (Resolución RE-0056-IE-2019). A continuación, se presentan los resultados de evaluar los TCO con la tarifa comercial T-CO.

---

[23] ARESEP fija tarifa promocional de recarga en buses eléctricos, ARESEP noviembre, 2020. https://aresep.go.cr/noticias/3125-aresep-fija-tarifa-promocional-de-recarga-en-buses-electricos.

[24] Consultado en noviembre 2020; Publicado en el Alcance N°256 Gaceta N°239 del 29 de setiembre del 2020 https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2I2YTM1MzEtYzlmYS00NmE1LWFlM2QtYWM2YTYzYTEzMmFlIiwidCI6IjBkNzIzOGY4LWI3ODQtNDk2MC1iZGUyLTZlMzM1MWQyNDcwZCIsImMiOjR9.

[25] Análisis metodológico para la comparación de precios de la electricidad entre Costa Rica y sus principales socios comerciales americanos, García 2017. http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00569.pdf.

[26] Estos valores cambian según la empresa distribuidora. Los valores asumidos en el presente son para T-CO del ICE. Sin embargo, la empresa distribuidora con mayor área de influencia geográfica es la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). Ver: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2I2YTM1MzEtYzlmYS00NmE1LWFlM2QtYWM2YTYzYTEzMmFlIiwidCI6IjBkNzIzOGY4LWI3ODQtNDk2MC1iZGUyLTZlMzM1MWQyNDcwZCIsImMiOjR9.

[27] Aresep establece tarifa competitiva para sector industrial, diciembre, 2020. https://aresep.go.cr/participacion/noticias/1579-aresep-establece-tarifa-competitiva-para-sector-industrial

Tabla 8. Comparación del costo total de propiedad a 15 años, escenario con tarifa comercial (T-CO) ($ USD).

Costo total de propiedad a 15 años ($ USD) – Escenario con tarifa comercial (T-CO)			
Ramal	Diésel	Eléctrico	Diferencia
02ª. Sabana – Cementerio Sentido Anti Horario	13.065.601	17.398.749	133%
58. San José – San Francisco	25.687.580	42.977.232	167%
13B. San José – Sabana – Estadio Sentido Horario por La Salle	12.084.056	16.179.957	134%
13ª. San José – Sabana – Estadio Sentido Horario	12.084.056	16.179.957	134%
16. San José – Barrio México	8.908.790	10.022.977	113%
70-9. San José – Desamparados – San Miguel – Urb. La Capri	14.304.814	16.342.281	114%
70-10. San José – Salitrillos de Aserrí	13.686.410	15.667.066	114%
7ª. San José – Cementerio – Sabana	9.071.084	10.627.735	117%
50I. San José – Sabanilla	12.542.596	15.646.947	125%
61-A. San José – Tirrases por San Francisco	11.441.133	13.774.234	120%
16. SJ – Barrio La Cruz por SC	6.129.890	6.247.717	102%
16. SJ – Barrio La Cruz por Seminario	5.449.844	4.648.509	-15%
20B. San José – Cuatro Reinas por Tibás	7.232.550	6.306.142	-13%
20C. San José – Cuatro Reinas por Cruce	7.207.471	6.287.812	-13%
14. San José – Pavas Zona 1	9.890.287	8.248.681	-17%
20F. San José – La Florida por Cruce	8.484.865	9.158.557	8%
10F. San José – Urb. Rositer Carballo por Pista	5.282.741	3.783.659	-28%
72-D. San José – San Antonio – Barrio Fátima	6.144.849	4.697.020	-24%
65C. San José – Quesada Durán	6.542.810	5.802.012	-11%
10ª. San José – La Uruca – La Peregrina	5.760.579	4.856.931	-16%

Fuente: Elaboración propia

La Tarifa Comercial presenta resultados muy variados entre los ramales. En general es muy desfavorable para la tecnología eléctrica, el TCO de los buses eléctricos no resulta tan competitivo con respecto a su equivalente de diésel *($12 millones de USD versus $10 millones de USD en promedio, respectivamente)*. Esto se debe a que el cobro binómico por potencia (kW) eleva el costo de la energía en un 69% promedio. Según estos resultados, el cargo por potencia corresponde aproximadamente al 64% promedio de los costos totales de la energía eléctrica en el escenario T-CO, en adición a que la tarifa base de consumo es 14% mayor que la preferencial T-BEB del escenario de referencia.

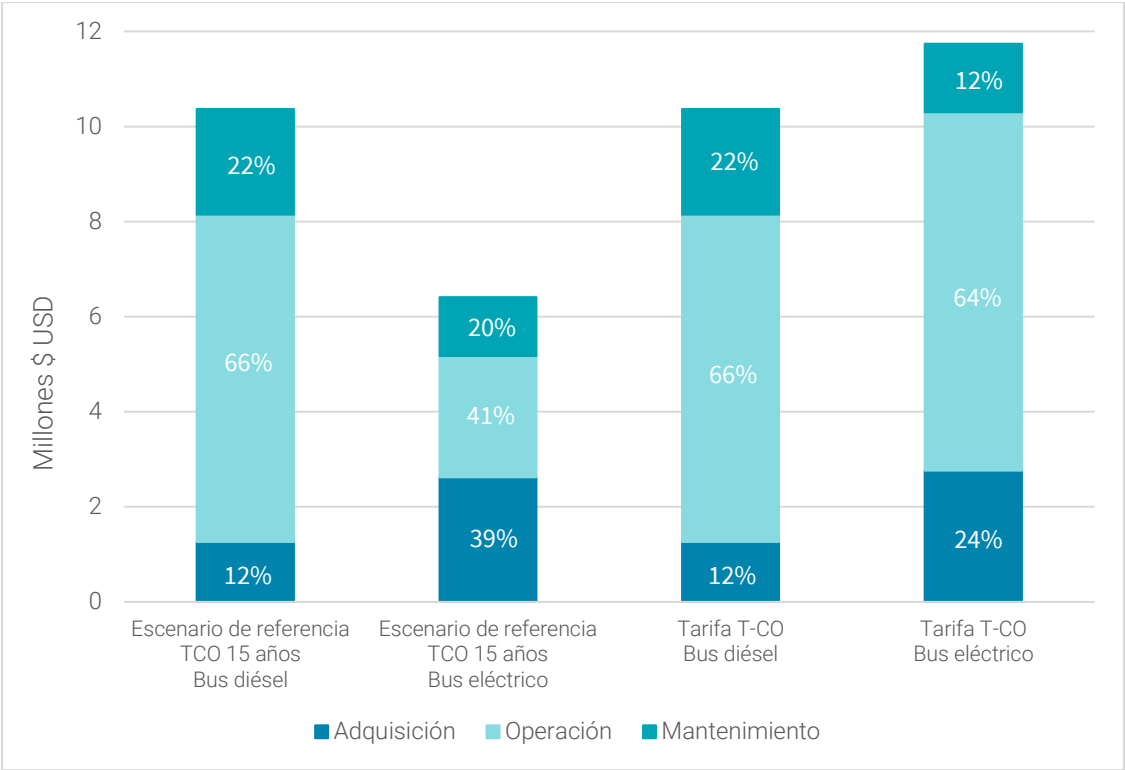

Figura 6. Comparación de escenarios de TCO promedio – escenario de referencia contra el de tarifa comercial ($ Millones de USD)

Fuente: Elaboración propia

4.2 Escenario COVID-19 y su disminución en el uso de transporte público

El contexto mundial de la pandemia COVID-19 tuvo efectos importantes en el transporte público del AMSJ. La Cámara Nacional de Transportes (CANATRANS) en Costa Rica reportó, a través de rueda de prensa, que la demanda había disminuido 63% durante los meses más críticos de la pandemia COVID-19 en Costa Rica (abril-mayo de 2020)[28,29,30]. Por su parte, la ARESEP, publicó modificaciones temporales en los horarios y en la ocupación máxima establecida, que bien puede influir en los consumos energéticos de los vehículos y, por ende, en los costos operacionales del servicio (costos del consumo de combustible por pasajero transportado). Por ejemplo, a algunas rutas les fue permitido modificar sus frecuencias y/o aumentar su flotilla en circulación entre un 20% y un 50% para cumplir con la demanda bajo las nuevas condiciones establecidas, mientras a otras (aquellas con recorridos de más de 75 km) le suspendieron temporalmente[31]. Por esta razón, se realizaron dos escenarios COVID-19, como se muestra a continuación.

[28] https://www.nacion.com/el-pais/servicios/representante-de-autobuseros-el-tema-de-las/HJFY72OXQJAT7AJMIORR33E4HM/story/.
[29] https://www.larepublica.net/noticia/empresas-de-transporte-publico-seguiran-operando-al-20-durante-abril.
[30] https://elperiodicocr.com/autobuseros-reducen-su-operacion-al-20-ante-crisis-por-coronavirus/.
[31] Autobús: modificación temporal de horarios COVID-19, Aresep, Julio 2020. https://aresep.go.cr/autobus/horario.

4.2.1 Escenario de disminución de la frecuencia en un 30%

Este escenario supone una reducción de los costos de operación y mantenimiento de las flotas como resultado de la disminución la frecuencia del transporte en un 30% (reflejado en los kilómetros recorridos diarios). Esta medida ha sido recomendada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para mitigar el impacto económico por el COVID-19 [32]. En el caso de la flota eléctrica, adicional a los costos de operación y mantenimiento, también se reduce la necesidad de comprar buses en la misma proporción. Se señala que éste último supuesto se asume proporcionalmente, ya que estimar la demanda de buses eléctricos por ramal, sale del alcance del presente estudio. No obstante, se reconoce que esto depende de la demanda del transporte público, por lo que la interpretación de resultados debe considerar este punto. A continuación, se presentan los resultados de este escenario.

Tabla 9. Comparación del costo total de propiedad a 15 años, escenario COVID-19 disminución de la oferta en 30% ($ USD)

Costo total de propiedad a 15 años ($ USD) – Escenario COVID-19 disminución de la oferta en 30%			
Ramal	Diésel	Eléctrico	Diferencia
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	10.464.441	6.507.696	-38%
58. San José - San Francisco	19.669.631	10.506.255	-47%
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	9.696.945	6.074.852	-37%
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	9.696.945	6.074.852	-37%
16. San José - Barrio México	7.210.113	4.567.697	-37%
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	11.040.159	5.968.765	-46%
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	10.607.276	5.825.933	-45%
7A. San José - Cementerio - Sabana	7.376.548	4.759.935	-35%
50I. San José - Sabanilla	9.912.265	5.871.254	-41%
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	9.088.411	5.462.096	-40%
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	5.106.395	3.461.597	-32%
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	4.431.668	2.737.199	-38%
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	5.732.392	3.303.702	-42%
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	5.714.836	3.297.910	-42%
14. San José - Pavas Zona 1	7.592.808	3.917.557	-48%
20F. San José - La Florida por Cruce	6.820.329	4.211.961	-38%
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	4.209.038	2.389.097	-43%
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	4.865.342	2.742.970	-44%
65C. San José - Quesada Durán	5.249.574	3.144.394	-40%
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	4.649.183	2.808.969	-40%

Fuente: Elaboración propia

[32] Acciones de política para mitigar los efectos del COVID-19 en los servicios de infraestructura. Brichetti, Navas, Rivas. BID, junio 2020. https://blogs.iadb.org/transporte/es/acciones-de-politica-para-mitigar-los-efectos-del-covid-19-en-los-servicios-de-infraestructura/.

4.2.2 Escenario de disminución de la frecuencia en un 20%

Durante los meses más críticos de la pandemia COVID-19, algunos operadores como los que representa CANATRANS, tomaron medidas para adecuar la oferta del servicio según la demanda. Así, se redujo la frecuencia del transporte público en un 20%, reflejado en este estudio en los kilómetros recorridos diarios. De la misma manera que en el escenario anterior (de reducción de la frecuencia en un 30%), los costos de adquisición de la flota eléctrica también se reducen porque se reduce la necesidad de comprar buses en la misma proporción. Se señala que éste último supuesto se asume proporcionalmente, ya que estimar la demanda de buses eléctricos por ramal, sale del alcance del presente estudio. No obstante, se reconoce que esto depende de la demanda del transporte público, por lo que la interpretación de resultados debe considerar este punto.

Tabla 10. Comparación del Costo total de propiedad a 15 años, escenario COVID-19 disminución de la oferta en 20% ($ USD)

Costo total de propiedad a 15 años ($ USD) – Escenario COVID-19 disminución de la oferta en 20%			
Ramal	Diésel	Eléctrico	Diferencia
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	11.331.494	7.240.474	-36%
58. San José - San Francisco	21.675.614	11.810.256	-46%
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	10.492.649	6.784.087	-35%
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	10.492.649	6.784.087	-35%
16. San José - Barrio México	7.776.339	5.061.625	-35%
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	12.128.377	6.662.845	-45%
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	11.633.654	6.499.609	-44%
7A. San José - Cementerio - Sabana	7.941.393	5.281.326	-33%
50I. San José - Sabanilla	10.789.042	6.551.404	-39%
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	9.872.652	6.083.796	-38%
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	5.447.560	3.797.511	-30%
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	4.771.060	2.988.774	-37%
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	6.232.444	3.636.206	-42%
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	6.212.381	3.629.586	-42%
14. San José - Pavas Zona 1	8.358.634	4.337.754	-48%
20F. San José - La Florida por Cruce	7.375.174	4.674.216	-37%
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	4.566.939	2.590.943	-43%
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	5.291.845	2.995.369	-43%
65C. San José - Quesada Durán	5.680.653	3.454.139	-39%
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	5.019.648	3.070.797	-39%

Fuente: Elaboración propia

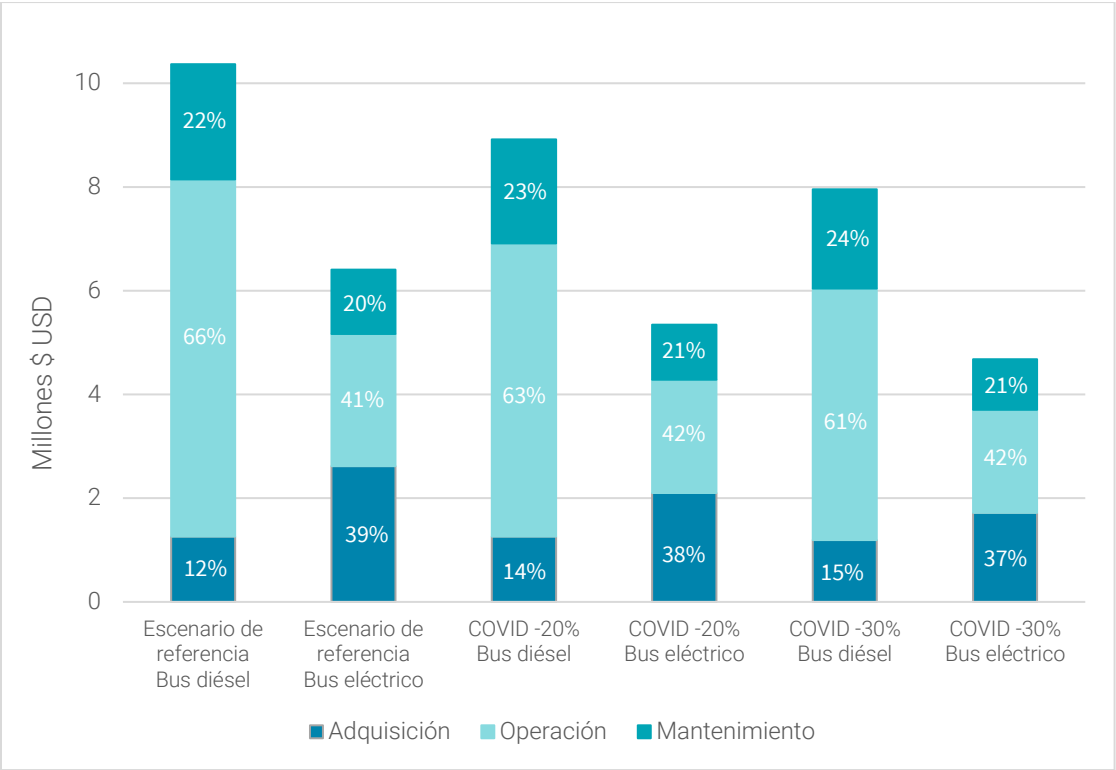

Figura 7. Comparación de escenarios de TCO promedio – escenario de referencia contra disminución de la oferta por COVID ($ Millones de USD)

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la distribución de costos se mantiene, aunque en general disminuyen los órdenes de magnitud de los TCO promedio, comparados con el escenario base. Sin embargo, estos resultados no significan un mejor resultado económico de la empresa, dado que la demanda de pasajeros reducida (que no fueron evaluadas en el presente estudio) provocan una reducción importante de ingresos al sistema.

4.3 Escenario tendencias del sector energético en Costa Rica

Para este escenario se analizó la evolución de los precios del diésel y la energía eléctrica de los últimos 10 años. Se utilizó la desviación estándar de sus variaciones porcentuales anuales para construir dos escenarios, alto y bajo con respecto al de referencia. Para ello los datos fueron obtenidos de las bases históricas publicadas por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) históricos sobre las fluctuaciones en los precios del diésel en Costa Rica y en el caso de la electricidad, se utilizaron las tendencias de la ARESEP[33,34].

[33] Precios Históricos, RECOPE, 2020. https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/historicos/.
[34] Tarifa de combustibles, Aresep 2020. https://aresep.go.cr/transparencia/datos-abiertos/tarifas-de-combustibles.

Tabla 11. Tarifas consideradas para construir el escenario de tendencia energética

Escenario tendencias de energía	Bajo		Medio*		Alto	
	Colones	USD	Colones	USD	Colones	USD
Precio electricidad	₡53	$0,09	₡57	$0,10	₡61	$0,10
Precio diésel	₡447	$0,74	₡543	USD 0.90	₡639	$1,06

**El escenario medio es el escenario de referencia (ver sesión 3.1.2)*

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados del TCO de los tres escenarios energéticos (el escenario medio es el de referencia del presente reporte). Aunque todos los TCO resultan favorables para los autobuses eléctricos, las órdenes de magnitud disminuyen y/o aumentan en función de los costos del combustible de los escenarios. Sin embargo, es el escenario alto el que presenta las mayores ventajas, ya que en promedio los TCO de los buses eléctricos son un 43% menores que el TCO de los autobuses diésel.

Tabla 12. Comparación del costo total de propiedad a 15 años – escenario de tendencias del sector energético ($ USD)

Ramal	Bajo		Medio – escenario de referencia		Alto	
	Diésel	Eléctrico	Diésel	Eléctrico	Diésel	Eléctrico
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	11.749.222	8.544.283	13.065.601	8.706.029	14.381.979	8.821.563
58. San José - San Francisco	22.642.054	14.044.046	25.687.580	14.418.257	28.733.106	14.685.551
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	10.876.002	8.054.122	12.084.056	8.202.559	13.292.110	8.308.585
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	10.876.002	8.054.122	12.084.056	8.202.559	13.292.110	8.308.585
16. San José - Barrio México	8.049.134	5.943.853	8.908.790	6.049.481	9.768.446	6.124.929
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	12.652.658	7.848.002	14.304.814	8.051.006	15.956.970	8.196.009
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	12.128.142	7.655.492	13.686.410	7.846.960	15.244.679	7.983.723
7A. San José - Cementerio – Sabana	8.213.524	6.218.736	9.071.084	6.324.106	9.928.644	6.399.371
50I. San José - Sabanilla	11.211.455	7.748.144	12.542.596	7.911.704	13.873.738	8.028.533
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	10.250.482	7.180.896	11.441.133	7.327.194	12.631.783	7.431.693
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	5.611.926	4.405.695	6.129.890	4.469.338	6.647.854	4.514.798
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	4.934.572	3.428.610	5.449.844	3.491.923	5.965.116	3.537.146
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	6.473.359	4.207.929	7.232.550	4.301.213	7.991.740	4.367.844
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	6.452.088	4.200.122	7.207.471	4.292.938	7.962.854	4.359.235
14. San José - Pavas Zona 1	8.727.593	5.035.286	9.890.287	5.178.149	11.052.981	5.280.193
20F. San José - La Florida por Cruce	7.642.487	5.495.221	8.484.865	5.598.726	9.327.243	5.672.658
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	4.739.368	2.927.868	5.282.741	2.994.634	5.826.114	3.042.323
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	5.497.324	3.420.605	6.144.849	3.500.167	6.792.373	3.556.998
65C. San José - Quesada Durán	5.888.337	3.993.213	6.542.810	4.073.629	7.197.283	4.131.070
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	5.198.131	3.525.342	5.760.579	3.594.452	6.323.028	3.643.815

Fuente: Elaboración propia

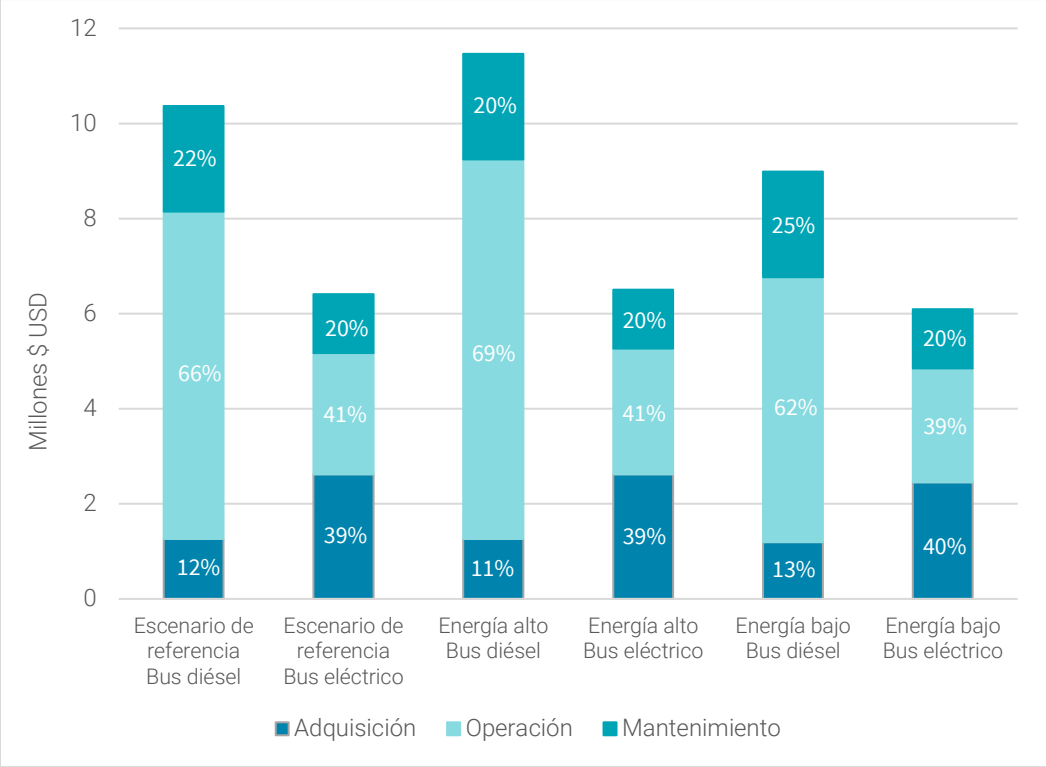

Figura 8. Comparación de escenarios de TCO promedio – escenario de referencia contra tendencias en el sector energético ($ Millones de USD)

Fuente: Elaboración propia

4.4 Escenarios reducción de la vida útil a 10 años

Las primeras experiencias sobre la implementación de movilidad eléctrica sugerían que la vida útil del vehículo eléctrico es de aproximadamente 10 años (relacionado con la vida útil de la batería). Dado que la tecnología eléctrica operando todavía está en sus primeras generaciones, aun no es posible contar con datos más precisos. Hasta ahora este periodo estaba asociado a las garantías que los proveedores ofrecen en función de la batería y no es limitativo. Sin embargo, experiencias como el Transantiago en Chile ha fijado una vida útil de 14 años en el bus eléctrico y 10 años en el bus diésel[35]. En el caso de los buses diésel, se tienen las certezas sobre su vida útil y está asociada -entre otras cosas- al deterioro del motor, que produce riesgos viales y afectaciones ambientales importantes. En cambio, el factor determinante en el caso de la flota eléctrica es el adecuado uso de la batería y la gestión de carga.

La vida útil ha resultado ser crucial para evaluar la rentabilidad del proyecto. Según la literatura, los parámetros más sensibles en un TCO comparativo son el kilometraje y los años de vida útil de los

[35] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf

buses[36]. Este último toma más relevancia en rutas con un kilometraje de medio a bajo, como lo son las rutas del AMSJ.

Para este escenario, se llevó el TCO de 15 a 10 años, y no se consideró un recambio de batería. A continuación, se muestran los resultados de asumir una vida útil de 10 años. Note que los resultados están comparados con el escenario de referencia en la figura 9, y en la 12 se encuentran expresados en costo por kilómetro.

Tabla 13. Costo total de propiedad, considerando una vida útil a 10 años ($ USD)

TCO ($USD) – Escenario vida útil de 10 años			
Ramal	Diésel	Eléctrico	Diferencia
02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	7.334.620	6.278.094	-14%
58. San José - San Francisco	13.899.927	9.930.102	-29%
13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	6.857.561	6.034.655	-12%
13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	6.857.561	6.034.655	-12%
16. San José - Barrio México	5.006.677	4.352.363	-13%
70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	7.690.825	5.443.905	-29%
70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	7.390.263	5.345.827	-28%
7A. San José - Cementerio - Sabana	5.147.079	4.613.842	-10%
50I. San José - Sabanilla	6.957.380	5.635.899	-19%
61-A. San José - Tirrases por San Francisco	6.360.515	5.225.469	-18%
16. SJ - Barrio La Cruz por SC	3.471.484	3.204.413	-8%
16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	2.956.395	2.345.456	-21%
20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	3.884.364	2.863.931	-26%
20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	3.872.175	2.859.953	-26%
14. San José - Pavas Zona 1	5.176.102	3.285.445	-37%
20F. San José - La Florida por Cruce	4.739.115	4.005.505	-15%
10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	2.752.133	1.847.474	-33%
72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	3.232.665	2.219.943	-31%
65C. San José - Quesada Durán	3.549.131	2.754.539	-22%
10A. San José - La Uruca - La Peregrina	3.107.421	2.394.738	-23%

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados, un aumento de 10 a 15 años de vida útil de los buses eléctricos implica, incrementar los costos de operación y de mantenimiento del TCO, sin embargo, disminuyen los costos por kilómetro (figura 12), lo que significa que podrían rentabilizarse de mejor manera lo costos capitales y el rendimiento del proyecto en general.

[36] A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities, Nurhadia, Boréna, Nya, 2014.

4.5 Discusión del análisis de sensibilidad

Aunque los costos dependen en gran medida de la configuración de la operación del transporte público y el mantenimiento, existen otras variables que también podrían influir positiva o negativamente; tales como estipulaciones gubernamentales, la infraestructura o bien, situaciones que salen del control de los operadores o incluso de las propias autoridades del país, como la crisis mundial a causa de la pandemia COVID-19.

El análisis de sensibilidad nos permite reducir la incertidumbre al evaluar diferentes situaciones que podrían afectar la rentabilidad del proyecto y en qué medida. A continuación, se enlistan de mayor a menor los escenarios evaluados que resultaron más influyentes en los costos del TCO.

Escenario evaluado	Influencia en escenario de referencia TCO eléctrico	Parámetro asociado
1. Adopción de la tarifa comercial, implica un cargo por consumo y por potencia.	+70%	• Costo de la energía eléctrica se ve afectado por el cobro binómico, por potencia.
3. Reducción de la vida útil, esto puede deberse por estipulaciones regulatorias o bien, porque el vehículo se ha deteriorado y tiene que salir de circulación.	+61%	• Kilometraje diario • Años de vida útil • Posiblemente no se requiere batería adicional
2. Reducción de la oferta (-20 - 30%) de transporte público a causa de factores externos como el contexto mundial de la pandemia COVID-19.	+5% ; +8%	• Kilometraje diario • Número de buses
4. Tendencias en los costos de la energía (bajo y alto).	-2% ; 1%	• Costo de la energía por km

Figura 9. Escenarios y parámetros que más influyen en el TCO según el presente estudio

Fuente: Elaboración propia

Utilizar la tarifa comercial T-CO para proyectos de movilidad eléctrica en el transporte público en vez de la T-BEB y la reducción de los años de vida útil, son las variables que más influyen en los TCO de las flotas a buses eléctricos.

En primer lugar, el uso de la tarifa T-CO provocaría que el TCO de los autobuses eléctricos incremente un 62% promedio en relación con los buses de diésel para el mismo periodo, resultado que justifica y fortalece la medida de las autoridades sobre la adopción de la tarifa preferencial (T-BEB). Así mismo, el cargo por potencia de la tarifa comercial provoca que el costo por kilómetro aumente aproximadamente 41% con respecto a este mismo dato en el escenario de referencia (ver figura 11). Se debe recordar que la tarifa T-CO, incluye un cobro por potencia a partir de un consumo de 3.000 kW mensuales y una tarifa base de consumo más alta[37]. El escenario utilizando la tarifa T-CO prácticamente no tiene posibilidades de ser rentable, los TCO de buses eléctricos que son menores a los de diésel se encuentran muy cercanos o dentro del margen de error de los datos (±10%).

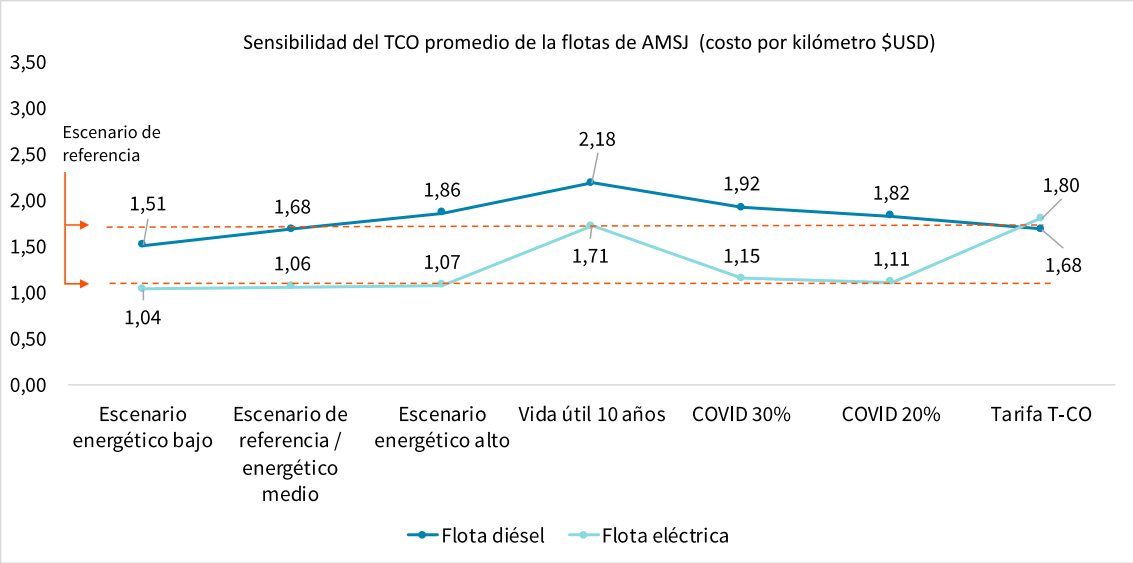

Figura 10. Sensibilidad del TCO de la flota a diésel evaluada en la AMSJ

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, cuando la vida útil se reduce 5 años, el costo por kilómetro aumenta en promedio un 23% en los buses diésel y 38% en los eléctricos, a pesar de que el orden de magnitud de los TCO disminuye. Esta reducción del TCO no es necesariamente buena ya que la inversión en capital sigue siendo la misma y el tiempo de depreciación es menor. Por lo tanto, podría ejercer una mayor presión sobre los costos operativos para rentabilizar el proyecto. En el caso de la flota a diésel, el tiempo de vida útil depende del deterioro del motor, de la calidad del mantenimiento y forma de uso, generalmente, es menor al periodo evaluado (8-12 años). En el caso de los buses eléctricos, su

[37] Se cobra por potencia máxima ¢10.917,07 por kW ($18,06 USD) más la tarifa que aplique al caso: ¢110,37 ($0,18 USD) por kWh para consumos igual o menores a 3.000 kWh y ¢66,04 ($0,11 USD) por cada kWh (cobro binómico).

deterioro está asociado a la pérdida de capacidad de la batería y se esperan garantías de vida útil de mínimo 14 años, tal como lo han ofertado algunos proveedores en otros países[38].

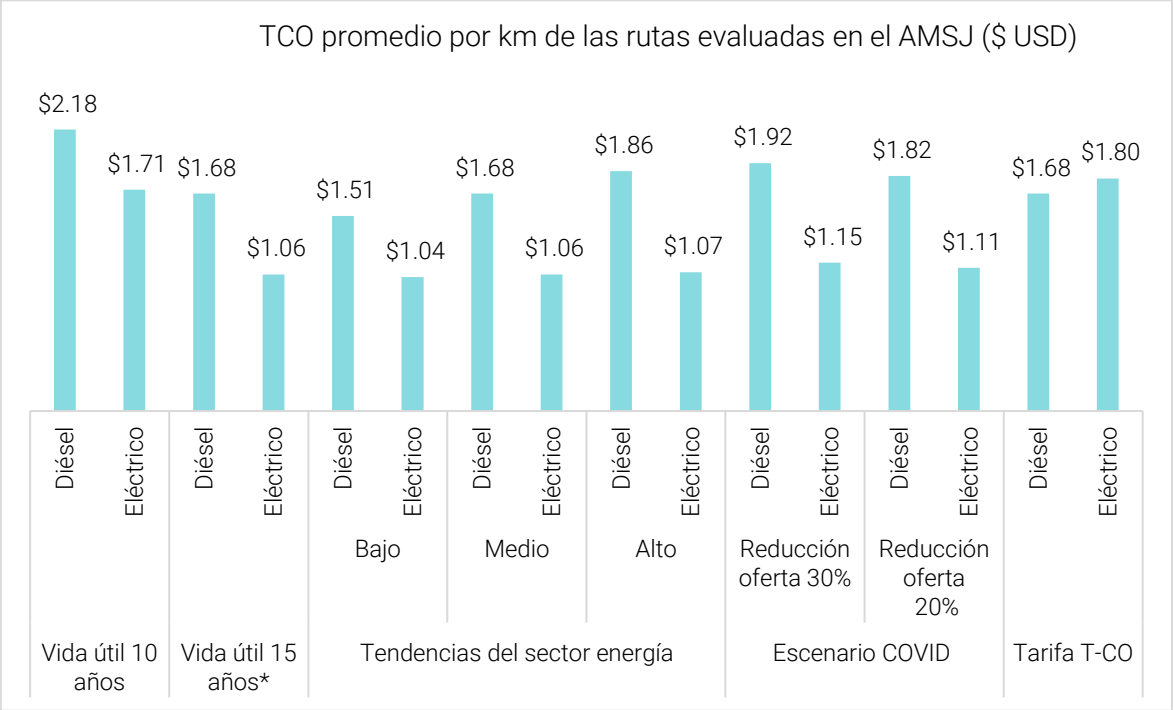

Figura 11. Comparación del TCO promedio por kilómetro de la flota evaluada en el AMSJ

Fuente: Elaboración propia

En general, los cambios aquí evaluados producen más inestabilidad en el TCO de la flota de diésel que en la eléctrica. Esto quizá se deba a que la tarifa de electricidad es relativamente más estable ante los escenarios evaluados en Costa Rica (ver sección 4.2). Adicionalmente, existen ventajas en el rendimiento energético en las tecnologías eléctricas (Tabla 5). Un elemento fundamental que puede hacer la diferencia en el éxito de la movilidad eléctrica es la estrategia de gestión de carga puesto que, bajo una estrategia adecuada se puede reducir la pérdida gradual de capacidad de la batería[39]. Algunas experiencias se han enfocado en una programación de carga nocturna centralizada, mientras que otras se han especializado en la optimización de la infraestructura de recarga. Por ello, es recomendable realizar los estudios correspondientes para determinar cuál es la estrategia de recarga más adecuada según el operador y el tipo de ruta.

[38] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf.
[39] Optimal Scheduling to Manage an Electric Bus Fleet Overnight Charging, Houbbadi, Trigui, Pelissier, Julio, 2019.

Los escenarios de reducción de la oferta por la pandemia COVID-19 en un 20% y 30%, incrementan los costos del TCO por kilómetro de las flotas eléctricas en 5% y 8%, respectivamente, y en el caso de los buses diésel un 8% y 12% (ver sección 4.2). Mientas que el escenario que evalúa la tendencia en el costo de la energía en Costa Rica, indica que, con los cambios experimentados en los últimos 10 años en el país, las variaciones en el precio no han resultado sustanciales, considerando la tarifa eléctrica preferencial de base y las desviaciones históricas.

5 Conclusiones

El nivel de costos del transporte público depende de las condiciones locales, temporales y geográficas de donde opera. La movilidad eléctrica para el transporte de pasajeros está en el auge como opción sustituta al transporte público con motores a diésel. Costa Rica tiene la oportunidad de renovar sus flotas de transporte público, maximizando las ventajas de contar con una matriz eléctrica renovable que potencializa el impacto de su adopción.

Para llegar a la meta de renovación del 5% de la flota cada dos años es necesario contar con estrategias de financiamiento de mayor fuerza, con instrumentos innovadores que requieren un cambio de cultura no solo de los operadores, sino también de las autoridades y los financistas sobre cómo desarrollan estas operaciones. En este sentido, se debe brindar soporte técnico a los operadores para comprender estos nuevos modelos de financiamiento e inversión y adaptar las finanzas en comparación con el statu quo. El presente estudio proporciona una primera aproximación al nivel de costos en caso de adoptar buses eléctricos en el transporte público. Se señala que los resultados de las rutas evaluadas arrojan una diferencia a favor de 38%, en promedio, comparado con operar a diésel.

Las inversiones asociadas a las operaciones de buses eléctricos generan economías de escala. En particular, las inversiones de adecuación de infraestructura eléctrica, estaciones de carga y depósitos al igual que mejoramientos en gestión de operación tienen menores costos marginales a mayor escala de intervención. Las y los inversionistas necesitan asegurar la rentabilidad de sus proyectos, y es responsabilidad de las autoridades y los operadores generar las condiciones de confianza para estos, a fin de disminuir el riesgo de su inversión.

Por un lado, la configuración radial del Transporte Publico en el AMSJ con rutas que salen desde el centro hacia la periferia de la ciudad aumentan los niveles de congestión y los tiempos de traslado, lo que disminuye la calidad de vida de los ciudadanos a efectos del transporte público (indicador de que el sistema de transporte público podría ser revisado y rediseñado de manera que pueda servir mejor la población[40]) y genera una percepción de riesgo en los procesos de renovación de flota que deben ser llevados a cabo. Aunado a lo anterior, se suma el acceso a garantías para la estabilización de ingresos que incluyen un diseño tarifario integrado que considere esta nueva tecnología en los modos de transporte, ya que actualmente el sistema presenta áreas de oportunidad asociadas a la estructura

[40] Plan integral de movilidad urbana sostenible para el Área Metropolitana de San José, Costa Rica. AC&A y Gensler, 2017.

lineal y a la falta de integración de la tarifa[41], el 40% de los viajes se desarrolla dentro del centro del AMSJ e implican al menos un trasbordo, que significa que muchos de los y las pasajeras deban hacer, al menos un nuevo pago de una segunda tarifa[42,43].

La adopción de la tarifa preferencial T-BEB representa un logro para la adopción de la electromovilidad en Costa Rica. No obstante, el costo de la energía del primer despliegue de buses eléctricos en el Transantiago obtuvo una tarifa de energía eléctrica similar en dólares a la tarifa preferencial de Costa Rica ($0,10 USD/kWh), siendo este último un país que cuenta con una matriz energética basada en fuentes renovables[44]. Aunque no deben hacerse comparaciones tarifarias directas entre países, puesto que hay otros factores que influyen en esta, algunos análisis comparativos de la literatura sugieren que, para el sector comercial e industrial, Costa Rica presenta precios mayores a los de México, Colombia, Estados Unidos, entre otros[45].

Finalmente, es necesario entender las condiciones de la accesibilidad a la infraestructura de recarga de cada operador y en cada ramal del sistema para mejor adecuar proyecciones de costo total de propiedad y de financiamiento. Esto requiere un trabajo y seguimiento arduo para entender los costos reales del despliegue tecnológico y planificar mejor una estrategia de electrificación gradual y paulatina. Al igual que determinar hasta qué punto la escala (de sustitución de la flota) genera costos de inversión marginales menores para mejor adecuar esa transición hacia tecnologías limpias.

El proyecto "Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica ("*Leapfrogging to electric buses in Costa Rica*" en inglés) busca generar información técnica útil para la introducción de los primeros autobuses eléctricos en el transporte público del AMSJ, y desarrollar las bases para elaborar acuerdos público-privados sobre los primeros pilotos masivos con una participación activa de empresas de energía y operadores de transporte público y demás actores interesados. Se espera que así, se pueda discutir una visión estratégica para la introducción progresiva de buses eléctricos y ser un aporte importante a los esfuerzos por cumplir los compromisos nacionales en reducción de gases de efecto invernadero.

---

[41] *Esto genera que viajes de similares características tengan diferencias de tarifas de hasta un 20% que se trasladan directamente al usuario,* generando distorsiones[30]

[42] Diagnóstico sobre la situación del transporte y la movilidad en Costa Rica, Sánchez, San José Costa Rica, 2018

[43] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020 https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf

[44] From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile, Zebra, 2020 https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf

[45] Análisis metodológico para la comparación de precios de la electricidad entre Costa Rica y sus principales socios comerciales americanos, García 2017. http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00569.pdf

6 Anexos

6.1 Descripción de escenarios evaluados en la modelación

Escenario 1: 50% de carga de pasajeros sin AC	Escenario 2: 100% de carga de pasajeros con AC
• Peso 50% de carga de pasajeros: 2.600 Kg • Consumo de accesorios con Aire Acondicionado apagado: 2kWh	• Peso 100% de carga de pasajeros: 5.200 Kg • Consumo de accesorios con Aire Acondicionado encendido: 5kWh
Escenario 3: 50% de carga de pasajeros con AC	**Escenario 4: 100% de carga de pasajeros sin AC**
• Peso 50% de carga de pasajeros: 2.600 Kg • Consumo de accesorios con Aire Acondicionado encendido: 5kWh	• Peso 100% de carga de pasajeros: 5.200 Kg • Consumo de accesorios sin Aire Acondicionado apagado: 2kWh

6.2 Autonomías de carga por ramales

A continuación, se presentan las autonomías de carga de los veinte ramales que resultaron con mayor potencial a electrificar, según los resultados de la modelación del estudio: "Elección de rutas basado en consumo de energía para el despliegue inicial de buses y su potencial de escalamiento, San José, Costa Rica", realizado en el marco del proyecto "Dando el salto a los buses eléctricos en Costa Rica.

Top	Rutas	Autonomías km/carga hasta un 20% de la capacidad de batería			
		Bus 1		Bus 2	
		50% de carga de pasajeros, AC Off	100% de carga de pasajeros, AC ON	50% de carga de pasajeros, AC Off	100% de carga de pasajeros, AC ON
1	02A. Sabana - Cementerio Sentido Anti Horario	257	167	283	192
2	65C. San José - Quesada Durán	229	160	256	185
3	16. San José - Barrio México	229	142	256	166
4	16. SJ - Barrio La Cruz por SC	226	128	253	150
5	72-D. San José - San Antonio - Barrio Fátima	223	149	250	174
6	16. SJ - Barrio La Cruz por Seminario	223	134	249	158
7	70-9. San José - Desamparados - San Miguel - Urb. La Capri	221	147	248	171
8	20B. San José - Cuatro Reinas por Tibás	219	135	246	159
9	61-A. San José - Tirrases por San Francisco	217	156	244	181
10	58. San José - San Francisco	217	160	244	185
11	7A. San José - Cementerio - Sabana	214	133	241	157
12	13B. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario por La Salle	214	120	241	142
13	13A. San José - Sabana - Estadio Sentido Horario	211	120	238	142
14	20F. San José - La Florida por Cruce	208	120	235	142
15	20C. San José - Cuatro Reinas por Cruce	207	134	234	157
16	10A. San José - La Uruca - La Peregrina	206	119	233	141
17	70-10. San José - Salitrillos de Aserrí	205	147	232	171
18	14. San José - Pavas Zona 1	205	172	232	198
19	10F. San José - Urb. Rositer Carballo por Pista	197	127	224	150
20	50I. San José - Sabanilla	195	110	222	131