

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN:

Análisis de viabilidad técnica-financiera de conversión de una flota de buses de combustión interna a buses eléctricos para transporte público de pasajeros en la empresa MUSOC, S.A.

Informe de práctica de especialidad para optar por el título de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, con el grado académico de Licenciatura

REALIZADO POR:
Andrés Hernán Barrantes Rodríguez

COORDINADOR DE PRÁCTICA:
Ing. Ignacio Del Valle Granados

Cartago, junio, 2023



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Carta de entendimiento

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Fecha: 6 June, 2023

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas del Tecnológico

Yo, **Andrés Hernán Barrantes Rodríguez**, envío al Sistema de Bibliotecas del Tecnológico (SIBITEC), el Trabajo Final de Graduación, del cual soy autor y fue presentado para optar por el grado de **Licenciatura**, en la fecha **7 June, 2023**, con el título del proyecto:

Análisis de viabilidad técnica-financiera de conversión de una flota de buses de combustión interna a buses eléctricos

Para ser publicado en:

- Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC, con el objetivo de ser visualizado a través de la red Internet, o
- Catálogo SIBITEC, uso exclusivo de la Comunidad TEC.

Autorizo con embargo¹ Fecha para publicar:

En el caso de que no se pueda publicar seleccione:

Confidencial Justificación:

Datos personales:

Nombre autor: **Andrés Hernán Barrantes Rodríguez**

Carrera en la que se presenta el TFG: **Ingeniería en Mantenimiento Industrial**

Campus Tecnológico / Centro: Académico: **Tecnológico Central Cartago**

Correo/s electrónico/s: **ahemanbarrantes@estudiantec.cr / ahemanbarrantes@gmail.com**

Camet: **2018089917**

Nº de identificación personal: **117690405**

**ANDRES HERNAN
BARRANTES
RODRIGUEZ (FIRMA)**

Firmado digitalmente por
ANDRES HERNAN BARRANTES
RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2023.06.06 18:32:45 -06'00'

Firma del estudiante

LIMPIAR

¹ Embargo: periodo de tiempo durante el cual el acceso o consulta a una publicación no está disponible.

Carta de aceptación de la empresa



Tels. 2771-1523 - 2771-0097
San Isidro, Páez Zeledón

San Jose, San Isidro, 19 de octubre del 2022

Señor
Ignacio del Valle Granados
Coordinador práctica profesional
Escuela de Ingeniería Electromecánica del TEC

Yo Ana Lisbeth Robles Rojas portadora del documento de identidad numero 1-1178-0302, en calidad de gerente administrativa de la empresa Grupo Gafeso Musoc, hago constar que hemos aceptado al señor:

Nombre: Andrés Hernán Barrantes Rodríguez
Número de cédula: 1-1769-0405
Número de carné de estudiante: 2018089917

Para que realice la práctica profesional con nuestra empresa Musoc, requerida en su carrera, esto también por medio de un proyecto:
Propuesta de análisis de viabilidad de conversión de una flota de buses de combustión interna a buses eléctricos para transporte público de pasajeros.

Mismo que nos ayudara con temas como recolección de datos, viabilidad de uso de buses eléctricos, ahorro en emisiones de gases de efecto invernadero, posible ahorro en costos de operación y mantenimiento e ir alineados al Plan Nacional de Descarbonización. El cual esperamos podamos poner en practica en nuestra empresa.

A su vez queremos solicitar mantener confidencialidad en los temas que sean necesarios que no se vea afectada la información propia e importante de Grupo Gafeso Musoc.

Sin más por el momento.

Saludos cordiales,

Ana Lisbet Robles Rojas
2771 0097

GAFESO, S. A.
Céd. Jur.: 3-101-080526-11

Profesor guía

Ing. Sebastián Mata Ortega

Asesores industriales

Sr. Allen José Fonseca Sánchez

Sra. Ana Lizbeth Robles Rojas

Tribunal examinador

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Ing. Julio Morera Hidalgo

Datos personales

Nombre completo: Andrés Hernán Barrantes Rodríguez

Número de cédula: 1-1769-0405

Número de carné: 2018089917

Edad: 22 años

Números de teléfono: 85043568

Correos electrónicos: ahernanbarrantes@estudiantec.cr

ahernanbarrantes@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: 150m sur de la entrada de emergencias del hospital

Escalante Pradilla, San Isidro de El General, Pérez Zeledón.

Datos de la Empresa

Nombre: MUSOC, S.A.

Actividad Principal: Transporte público interurbano entre Pérez Zeledón, San José y la Zona de los Santos y encomiendas entre estos mismos destinos.

Dirección: Frente al Hospital de la Mujer, antigua Maternidad Carit, San José, Costa Rica.

Contacto: Ana Lisbeth Robles Rojas

Teléfono: 2771-0097

Dedicatoria

A mis papás y mi familia por su cariño y su apoyo en todos estos años en los que no estuve en casa por estar recibiendo clases lejos de ella, por su sacrificio y dedicación.

A mis hermanas y a mi hermano por su apoyo incondicional en mi meta de cumplir mi sueño de ser ingeniero.

A mis amigos y compañeros del TEC, por su gran amistad y los buenos momentos que pasamos, en especial, pero sin ningún orden en particular: Jerica, Felipe, Ixel, Julio, Vital, Alfredo, Juan, Kevin, Steven y Esteban.

A mis profesores por ser los pilares de mi educación, transmitiéndome su conocimiento y motivación en mi formación académica y profesional.

A mis abuelos, que a todos se los prometí en su momento.

Agradecimientos

A mis padres, hermanos, familiares y amigos por apoyarme en todo momento y siempre estar pendientes.

Al Tecnológico de Costa Rica por ser la institución que me formó en mi camino para volverme profesional.

A mi profesor guía Sebastián Mata, por haberme apoyado en mi proyecto desde antes de haberlo empezado y por la calidad de sus clases en los múltiples cursos que me impartió.

A MUSOC por confiar en mi para realizar mi proyecto de graduación y a Allen Fonseca y Lizbeth Robles por su gran ayuda en todo momento dentro de la empresa.

A Luis Fernando Andrés Jácome y Carlos Sánchez por la gran ayuda brindada.

Resumen

En el presente documento se lleva a cabo un análisis financiero de la adquisición de una flota de buses eléctricos para la posible sustitución de 8 buses de la flota actual de MUSOC. El análisis financiero se basa en el análisis del costo de ciclo de vida útil de un activo (LCCA) realizado para la adquisición de una flota de buses tanto eléctricos como de combustión interna, evaluando los 15 años de vida útil permitidos. Se analiza los costos relacionados a la adquisición, operación, mantenimiento y descarte de las flotas de buses, incluyendo el costo de la infraestructura eléctrica en el caso de los buses eléctricos. Para llevar el LCCA a cabo se analiza en primera instancia el contexto operativo de la ruta y la empresa para posteriormente analizar el mercado de buses eléctricos y encontrar un candidato a modelo apto para su implementación en la flota de MUSOC. El bus eléctrico seleccionado es un Yutong ZK6127BEV, cuyo cargador es de dos pistolas y entrega un máximo de 160 kW. Con el modelo seleccionado y la potencia del cargador, se realiza el diseño de la infraestructura eléctrica necesaria para alimentar los cargadores en base a lo establecido en el Código Eléctrico Nacional (NEC) y se cotiza la infraestructura propuesta. Fundamentado en los datos brindados por MUSOC, se realiza también el LCCA de los 8 buses actuales a analizar su reemplazo. Con el LCCA realizado tanto para la flota de buses actuales, como para la de buses eléctricos y la de buses de combustión interna nueva, se calcula el costo total de propiedad (TCO) de las tres flotas y se obtiene el valor actual neto (VAN) de los costos de las posibles nuevas flotas. De acuerdo con esta metodología, la flota de buses eléctricos posee el menor TCO de las flotas analizadas, tanto como el menor VAN de los costos relacionados a las flotas, menor costo de operación y de mantenimiento en su vida útil. Subsecuentemente se realiza el análisis del impacto ambiental producido por la hipotética

sustitución de 8 de los buses de la flota actual por buses eléctricos. Dicho análisis arrojó un 97,42% de ahorro en emisiones de CO₂ directas al utilizar buses eléctricos, además de la eliminación de emisiones de otras partículas contaminantes.

Palabras clave: Bus eléctrico, Plan de descarbonización, ahorro energético, análisis de costo de ciclo de vida, costo total de propiedad, infraestructura eléctrica.

Abstract

In the present document, a financial analysis is conducted on the acquisition of an electric bus fleet for the possible replacement of eight buses in MUSOC's current fleet. The financial analysis is based on a Life Cycle Cost Analysis (LCCA) conducted for the acquisition of both electric and internal combustion engine bus fleets, evaluating the allowed 15-year lifespan. Costs related to the acquisition, operation, maintenance, and disposal of bus fleets are studied, including the cost of electrical infrastructure in the case of electric buses. To conduct the LCCA, the operational context of the route and the company is first analyzed, and then the electric bus market is examined to find a suitable model candidate for implementation in MUSOC's fleet. The selected electric bus is a Yutong ZK6127BEV, with a charger that has two pistols and delivers a maximum of 160 kW. With the selected model and charger power, the necessary electrical infrastructure design to power the chargers is created based on what is established in the National Electrical Code (NEC), and the proposed infrastructure is priced. Based on the data provided by MUSOC, an LCCA is also performed on the eight current buses to analyze their replacement. With the LCCA conducted for both the current bus fleet, the electric bus fleet, and the new internal combustion bus fleet, the

Total Cost of Ownership (TCO) of the three fleets is calculated, and the net present value (NPV) of costs of the possible new fleets is obtained. According to this methodology, the electric bus fleet has the lowest TCO among the fleets analyzed, as well as the lowest NPV of costs related to the fleets, lower operating cost, and maintenance cost over its lifespan. Subsequently, an analysis is conducted on the environmental impact produced by the hypothetical substitution of eight of the current fleet's buses with electric buses. The analysis revealed a 97,42% reduction in direct CO₂ emissions by using electric buses, in addition to the elimination of emissions from other polluting particles.

Keywords: Electric bus, Decarbonization plan, energy saving, life cycle cost analysis, total cost of ownership, electrical infrastructure.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	1
Introducción	1
Antecedentes	2
Reseña de la Empresa	6
Planteamiento del problema.....	6
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos	10
Justificación	11
Viabilidad.....	14
Alcance	14
Limitaciones.....	15
Plan de trabajo	15
Capítulo 2. Marco metodológico	18
Metodología planteada.....	18
Capítulo 3. Marco teórico.....	19
1. Plan de Descarbonización.....	19
2. Plan Nacional de Energía 2015-2030	19
3. Valor actual neto (VAN)	20
4. Transporte público.....	21

5. Vehículo cero emisiones.....	21
6. Baterías para vehículo eléctrico.....	21
7. Buses eléctricos de baterías	22
8. Centro de recarga.....	22
9. Análisis de costo de ciclo de vida útil	22
10. Costo total de propiedad (TCO).....	23
11. Calidad del aire	24
12. Coeficiente de correlación lineal de Pearson	24
Capítulo 4. Análisis de resultados	26
Objetivo 1.	26
Características operativas.....	26
Características de los buses actuales	32
Revisión de la oferta de buses eléctricos.....	34
Objetivo 2.	36
Diseño de la infraestructura eléctrica	36
Objetivo 3.	42
Buses actuales (Bus tipo MB).....	42
Costo de adquisición.....	42
Costo de mantenimiento	43
Costo de operación	51

Costo de descarte	54
Costo del ciclo de vida	56
Buses eléctricos (Yutong ZK6127BEV).....	57
Costo de adquisición.....	57
Costo de mantenimiento	60
Costo de operación	61
Costo de descarte	61
Costo del ciclo de vida	62
Buses diésel nuevo	63
Costo de adquisición.....	64
Costo de mantenimiento	64
Costo de operación	64
Costo de descarte	65
Costo del ciclo de vida	65
Análisis financiero.....	66
Análisis comparativo.....	68
Objetivo 4.	71
Emisiones relacionadas a la flota de buses de combustión interna	71
Emisiones relacionadas a la flota de los buses eléctricos.....	74
Análisis comparativo.....	76

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	78
Conclusiones	78
Objetivo específico 1. Sobre el estudio de mercado y el contexto operativo.....	78
Objetivo específico 2. Sobre la infraestructura eléctrica.....	78
Objetivo específico 3. Sobre el análisis de costo de vida útil	79
Objetivo específico 4. Sobre el impacto ambiental.....	79
Recomendaciones	80
Capítulo 6. Bibliografía	82
Capítulo 7. Apéndices	90
Apéndice 1. Cálculos de calibres de conductores de líneas, neutro y tierra, diámetros de ductos, disyuntores, selección del transformador y caídas de voltaje, para el diseño de la infraestructura eléctrica.....	90
Cálculo del calibre de los conductores, capacidad de los breakers, tamaño de los ductos y caída de voltajes de los circuitos ramales.....	90
Cálculo de la capacidad del transformador; calibre de los conductores, capacidad de los breakers, tamaño de los ductos y caída de voltajes de los circuitos primario y secundario del transformador	95
Apéndice 2. Cálculo de la correlación de los datos de la figura 24	100
Apéndice 3. Cálculo del costo de los impuestos al monto de adquisición CIF de los buses eléctricos Yutong ZK6127BEV	101
Apéndice 4. Cálculo del costo de la infraestructura eléctrica.....	102

Apéndice 5. Cálculo de los costos relacionados al consumo de energía para las flotas 8 buses diésel y eléctricos a los 15 años	104
Apéndice 6. Análisis financiero para la adquisición de la flota de 8 buses eléctricos....	106
Capítulo 8. Anexos	109
Anexo 1. Características del bus eléctrico Yutong ZK6127BEV y el cargador SZ-160	109
Anexo 2. Cotización del bus Yutong ZK6127BEV y anotaciones.....	110
Anexo 3. Artículos del NEC utilizados	111
Anexo 4. Reporte de rendimiento de modelo similar de buses Yutong en Bogotá, Colombia	120

Índice de figuras

Desglose de los costos de ciclo de vida para los distintos tipos de buses.	12
Emisiones de CO2 proyectadas a 50% de capacidad.	13
Diagrama de Gantt.....	17
Gráfico de cantidad de viajes diarios según su destino.	27
Ruta habitual de los buses de MUSOC.	28
Ruta alternativa de los buses de MUSOC.	28
Perfil de elevación de la ruta de la figura 5 (el punto izquierdo corresponde a la terminal de San José y el derecho al plantel de Gafeso).....	29
Recorrido mensual por bus acorde al horario regular actual, contemplando fechas de alta demanda.....	30
Recorrido mensual por bus en el periodo de 2021 y 2022	31
Gráfico de series temporales de la cantidad de carreras por día de la semana durante 24 meses	32
Años de antigüedad y cantidad de buses por marca.	33
Vista satelital del plantel del Grupo Gafeso MUSOC en San Isidro de El General, para obtener el área utilizable de estacionamiento de buses.	37
Configuración espacial de la parte visible de la instalación eléctrica.	38
Diagrama unifilar de la infraestructura eléctrica propuesta para la alimentación de 4 cargadores Yutong SZ-160.....	39

Gastos de mantenimiento de los buses tipo MB por mes en los años 2021 y 2022.	44
Gastos de mantenimiento de los buses tipo Scania por mes en los años 2021 y 2022.....	44
Gastos de mantenimiento por kilómetro por tipo de mantenimiento de los buses tipo MB por mes en los años 2021 y 2022	46
Gastos de mantenimiento correctivo por kilómetro de los buses tipo MB a los 15 años de vida útil.....	48
Gastos de mantenimiento preventivo por kilómetro de los buses tipo MB a los 15 años de vida útil.....	48
Gastos de mantenimiento correctivo anual de los buses tipo MB durante los 15 años de vida útil.....	49
Gastos de mantenimiento preventivo anual de los buses tipo MB durante los 15 años de vida útil.....	50
Rendimiento de diésel en litros por kilómetro de los buses de MUSOC mensualmente en los años 2021 y 2022.....	51
Costo del diésel por mes utilizado por los modelos tipo MB en 2021 y 2022.....	52
Costo del litro de diésel en 2021 y 2022 en base a datos obtenidos y a datos de la ARESEP.	52
Proyección de costos de baterías LFP hasta el año 2030.	59
Gráfico de costos netos acumulados en valor actual de la flota de buses eléctricos y de buses de diésel nuevos a lo largo de los 15 años de ciclo de vida útil.	68

Gráfico de barras apiladas con los costos de adquisición, mantenimiento, operación y
descarte de una flota de 8 buses por tipo de bus analizado. 70

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de desviación entre debiera y realidad.	9
Tabla 2. Actividades por realizar en el proyecto.	16
Tabla 3. Metodología del proyecto.	18
Tabla 4. Características y cantidad de buses por marca.	33
Tabla 5. Características de los buses preseleccionados.	35
Tabla 6. Características del cargador Yutong SZ-160 de estándar chino con carga simultánea.	36
Tabla 7. Gasto por tipo de mantenimiento en los años 2021 y 2022 de los buses tipo MB.	45
Tabla 8. Gasto de mantenimiento por kilómetro por tipo de mantenimiento en los años 2021 y 2022 de los buses tipo MB.	46
Tabla 9. Gasto de mantenimiento de la flota de buses tipo MB en los 15 años de vida útil.	50
Tabla 10. Costos fijos de operación para una flota de 8 buses.	54
Tabla 11. Cálculo del TCO de la flota de 8 buses tipo MB.	56
Tabla 12. TCO de los buses tipo MB por km.	56
Tabla 13. Costos de la infraestructura eléctrica necesaria para instalar los cargadores de buses eléctricos.	58
Tabla 14. Costo de las baterías actuales del bus Yutong ZK6127BEV y costo de adquisición de paquete de baterías a los 10 años.	60
Tabla 15. Gasto de mantenimiento de los 8 buses eléctricos en los 15 años de vida útil.	60

Tabla 16. Costos de energía eléctrica asociados a la operación de la flota de 8 buses eléctricos.	61
Tabla 17. Valores residuales de los paquetes de baterías LFP.	62
Tabla 18. Cálculo del TCO de la flota de 8 buses eléctricos.....	63
Tabla 19. TCO de los buses eléctricos por km.	63
Tabla 20. Gasto de mantenimiento de los 8 buses diésel nuevos en los 15 años de vida útil.	64
Tabla 21. Costos de consumo de diésel asociados a la operación de la flota de 8 buses diésel nuevos.....	65
Tabla 22. Cálculo del TCO de la flota de 8 buses diésel nuevos.	65
Tabla 23. TCO de los buses diésel nuevos por km.....	66
Tabla 24. Comparación de costos de las flotas de buses diésel nuevos y la de buses eléctricos.	66
Tabla 25. VAN de los costos del proyecto de adquisición de una flota de 8 buses diésel nuevos y 8 buses eléctricos nuevos.....	67
Tabla 26. Factores de emisión de gramos de partículas contaminantes por kilómetro para buses diésel según su tecnología EURO.....	71
Tabla 27. Emisiones de contaminantes producidos por la flota de 8 buses tipo MB de MUSOC.....	72
Tabla 28. Esquema de aplicación de aceites lubricantes a los distintos sistemas del bus.	73

Tabla 29. Cantidad de litros de lubricante aplicados a los buses tipo MB de la flota de MUSOC.....	73
Tabla 30. Emisiones de CO2 relacionadas a la aplicación de lubricantes en la flota de 8 buses tipo MB de MUSOC.....	74
Tabla 31. Cantidad de litros de lubricante aplicados a los buses tipo eléctricos y a una flota de 8 buses eléctricos a 15 años de vida.	75
Tabla 32. Emisiones de CO2 relacionadas a la aplicación de lubricantes en la flota de 8 buses eléctricos.....	75
Tabla 33. Consumo de energía de la flota de 8 buses eléctricos.	76
Tabla 34. Emisión de CO2 emitida por la flota de 8 buses eléctricos.....	76
Tabla 35. Emisiones relacionadas a la operación de 8 buses de una flota de buses tipo MB con una de buses eléctrico, ambas para 15 años de operación.	77

Nomenclatura

MINAE: Ministerio Nacional de Ambiente y Energía

NEC: Código Eléctrico Nacional

ACCV: Análisis de costo de ciclo de vida útil

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad

m: metro, unidad de distancia

km: Kilómetros

g: gramo, unidad de masa

kg: Kilogramo

kWh: Kilowatt-hora, unidad de energía

J: Joule, unidad de energía

l: Litro, unidad de volumen equivalente a 0,001 metro cúbico

TCO: Costo total de propiedad

VAN: Valor actual neto

Capítulo 1. Introducción

Introducción

El transporte público más utilizado en la mayor parte de América Latina y el Caribe son los autobuses (Ortega, 2018). Estos son el medio de transporte de muchos costarricenses diariamente. No obstante, el sector transporte representa el 66% del consumo de hidrocarburos y el 54% de las emisiones de CO₂ del país (MINAE, Plan Nacional de Energía 2015-2030, 2015). Del total de emisiones con origen en el sector transporte, los automóviles particulares representan la mayor parte con un 41%, seguido de los vehículos de carga liviana y pesada con un 22%, las motocicletas con un 16% y el transporte público con un 7%, entre otros contaminantes como autobuses privados, equipo especial y otros. Dada dicha participación en la liberación de gases de efecto invernadero, surge la meta de electrificación del transporte público y adopción de tecnologías cero emisiones del Plan Nacional de Descarbonización. Esta meta propone para el año 2035 que un 30% de la flota de transporte público será cero emisiones (Gobierno de Costa Rica, Plan de Descarbonización, 2018).

Para optar por un sistema de transporte público cero emisiones, se debe tener en cuenta los vehículos que utilicen fuentes de energía renovables y que en su uso no emitan gases de efecto invernadero. Entre las opciones más populares están los buses de hidrógeno y los buses eléctricos. Los buses a base de hidrógeno están mejor acondicionados para viajes largos mientras que los buses eléctricos son más eficientes en rutas urbanas (Logan, Nelson, & Hastings, 2020). No obstante, cuando los buses recorren rutas largas, impera más la tecnología de carga que la capacidad de las baterías en el ahorro de costos (Lin, Zhang, Shen, & Miao, 2019). Al ser la matriz eléctrica costarricense prácticamente 100% renovable, contar

con un excedente de producción de energía y tener una cobertura eléctrica nacional de un 99,4%, el país concentra las condiciones ideales para la implementación de proyectos de electrificación del transporte en base a energías limpias (Kruse, 2021).

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un análisis que permita dilucidar las diferencias en costos y consumo de energías entre un bus de combustión interna y un autobús eléctrico, tomando en cuenta todas las fases del ciclo de vida que tiene dicho activo en la empresa autobusera. Para lograr dicho cometido se realiza un análisis del costo de ciclo de vida útil (ACCV). Dicho análisis divide las fases del activo en la empresa en 4, las cuales son adquisición, operación, mantenimiento y descarte. En dichas etapas se encuentran agrupados todos los gastos que representará un bus desde su llegada a la empresa hasta su salida de esta.

Antecedentes

En el Plan Nacional de Descarbonización emitido por el gobierno de Costa Rica en 2018, se evaluaron metas varias para el sector del transporte público. Se plantearon 10 ejes de la descarbonización, donde el primero de estos “Desarrollo de un sistema de movilidad basado en transporte público seguro, eficiente y renovable y en esquemas de movilidad activa” establece en su visión de transformación 4 puntos. Entre las metas dadas en dichos puntos, destacan la visión para el 2035 de tener un 30% de la flota cero emisiones y para el 2050 un 85% de la flota con las mismas características (Gobierno de Costa Rica, Plan de Descarbonización, 2018).

Según el reporte de avances en la implementación del Plan Nacional de Descarbonización al 2021 del gobierno de Costa Rica (2022), a la fecha de su publicación el

61% de las metas planteadas para el periodo 2018-2022 fueron completadas, un 22% están en marcha y un 17% se categoriza con riesgo de incumplimiento y se estima que para el cierre de 2022 el 83% de las metas del periodo serán completadas. En lo respectivo del primer eje de la descarbonización, se espera que para el cierre de 2022 el 87% de las metas del periodo se cumplan. Entre los logros de dicho eje a la publicación del reporte de avances al 2021 está que se han piloteado exitosamente 2 rutas de transporte público urbano con buses eléctricos, con el fin de generar datos para fines técnicos. Dichos datos son de utilidad para analizar opciones de movilidad eléctrica en las flotas de autobuses.

Las rutas utilizadas para toma de datos fueron: San José-Desamparados-San Rafael y San José-Alajuela. Kruse (2021) indica que entre los resultados preliminares del plan piloto para la primera ruta se tuvo un recorrido diario promedio de 147 km, al finalizar el día los buses contaban con 55% de carga y el costo de operación de los buses eléctricos fue entre 5 y 6 veces más económico que el de los buses diésel. Para la segunda ruta el kilometraje diario fue de 235 km y los buses finalizaban el día con un porcentaje de batería entre un 31% y un 34%. Solo para el mes de mayo de 2021, el costo diario por combustible para las unidades de diésel fue de ₡49 501,5 mientras que para el bus eléctrico fue de ₡7 898,6 (MINAE, Costo diario de buses eléctricos es cinco veces menor a los de diésel, según primeros resultados de plan piloto, 2021).

En un estudio y planeación en China acerca del tiempo óptimo para cargar un bus eléctrico utilizando una tarifa cambiante con el tiempo del día, Liu, Wang, Zeng, & Bie (2022) encontraron en base a un análisis numérico que, para viajes con horarios fijos, se pueden llegar a tener ahorros de hasta 29,5% en la factura eléctrica si se hace una buena planificación de recarga.

Du y otros (2019) realizaron un análisis de buses eléctricos de baterías (BEBs) de distintos tamaños, para examinar su desarrollo entre los principios y la interacción entre los factores que influyen su penetración en el mercado, basados en datos técnicos e industriales de BEBs disponibles en el mercado chino. Se encontró que los BEBs juegan un rol importante en la reducción de las emisiones urbanas.

Li y otros (2018) estudiaron 22 casos en ciudades distintas en 14 países en América, Asia, Oceanía y Europa, y en sus resultados dieron con tres factores clave para la adopción de buses eléctricos alrededor del globo. El primer factor son las subvenciones tanto públicas como privadas dedicadas a sustituir partes de una flota de buses de combustión interna a buses eléctricos. El segundo factor son las fuentes de financiación menos costosas, que pueden provenir de las distintas partes interesadas. El tercer factor son las formas innovadoras de estructurar la implementación contractual entre las partes interesadas e involucrar a terceros, lo que conduce a riesgos compartidos, mayor eficiencia y mejor desempeño.

En su estudio acerca de la aceptación del público y el impacto ambiental de los servicios de bus eléctrico para la empresa TransJakarta en Yakarta, Indonesia, Sunitiyoso y otros (2022) encontraron que la implementación de buses eléctricos podría reducir las emisiones anuales de CO₂ hasta en 95 332 825 kg. Además, se indicó que el porcentaje de la flota que será bus eléctrico para 2030 es del 83%.

En el caso de Europa, en Alemania se tiene planificado electrificar el transporte público tanto en Berlín como en Hamburgo para 2030 (Byrne, Bach, & Finkbeiner, 2021). Logan y otros (2020) en su estudio acerca de la electro-conversión del Reino Unido indican

que los buses de hidrógeno y los buses eléctricos producen mucho menos emisiones por persona en comparación a los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna.

En otro estudio realizado en el Reino Unido, McGrath y otros (2022) concluyeron que dependiendo de la localización geográfica el rango de la batería de un bus eléctrico de dos pisos se puede reducir hasta en un 17,3%, debido a la carga térmica requerida para las distintas temperaturas ambientales. En dicho estudio observaron un 26% de disminución en el rango de la batería en su tiempo de vida útil, en las baterías de óxido de litio níquel manganeso y cobalto (NMC), lo que tuvo un efecto de un crecimiento de un 7% en el consumo de energía requerido para completar una ruta.

En su investigación “*Electric buses in England and Sweden—Overcoming barriers to introduction*”, Aldenius y otros (2022) encontraron que un denominador común en todos los casos estudiados fueron los altos costos de la inversión a realizar y que los desafíos que pueden afrontar difieren mucho según el contexto específico.

Según un estudio realizado en base a simulaciones y datos de rutas existentes en Finlandia y California para realizar un análisis de costo de vida de buses eléctricos con diferentes métodos de carga, Lajunen (2018) encontró en dicho análisis que la capacidad de almacenamiento de energía de la batería no es un componente mayor en el costo. Se indicó que una mayor capacidad de la batería permite una mayor flexibilidad para utilizar estrategias de carga. El autor también afirma que el costo del ciclo de vida útil de los buses eléctricos está disminuyendo año con año debido a la competencia en el mercado de los buses y los dispositivos de carga. Un factor común en los casos donde se obtuvieron los datos es el alto costo de la inversión inicial y de la instalación de los puestos de carga.

Reseña de la Empresa

MUSOC, S.A., parte del Grupo Gafeso, es una empresa dedicada al transporte de personas y de encomiendas entre sus terminales en Pérez Zeledón, San José y la Zona de los Santos. MUSOC fue fundada en 1964 por tres personas de apellidos Murillo, Solano y Corrales, cuyas iniciales (Mu-So-C) son la razón del nombre de la empresa. MUSOC realiza múltiples viajes al día en un horario que abarca de las 4:30 am en adelante.

Planteamiento del problema

El transporte público influye directamente en varios de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los objetivos son el ODS 3 sobre salud gracias a la reducción de la contaminación y la mayor seguridad vial, el ODS 7 sobre energía, el ODS 8 sobre crecimiento económico y empleo pleno, el ODS 9 sobre infraestructura resiliente, el ODS 11 sobre ciudades sostenibles debido al acceso al transporte público ampliado, y al ODS 12 sobre la producción sostenible. También afecta indirectamente al resto de ODS (Sustainable mobility for all, 2021).

El plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030 del gobierno de Costa Rica (2018) incentiva la movilidad eléctrica en el sector de transporte público, debido a la alta visibilidad por parte de la población por su uso masivo ya que se pueden lograr mejores condiciones de los usuarios debido a los bajos niveles de ruido. Lo anterior evidencia una disminución en la emisión de ruido entre un bus de combustión interna y uno eléctrico.

La información proveniente de los estudios realizados sobre la movilidad eléctrica en los buses informa acerca de datos y variables en rutas ajenas a las costarricenses. A excepción de un estudio realizado en dos rutas en la Gran Área Metropolitana, no se cuenta con datos

de rendimiento, kilometraje, consumo, regeneración y otras variables en otras rutas del país. Dicha información es relevante para las empresas autobuseras para poder realizar análisis de viabilidad sobre su conversión a una flota eléctrica.

Rahmani y otros (2021) evaluaron en un estudio el rendimiento cognitivo de los conductores de bus respecto a la exposición al ruido y a la vibración, dos factores que un motor eléctrico reduce drásticamente. En su estudio encontraron que un gran estresor para los conductores es la pobre ergonomía de la cabina y que a mayor ruido y vibración mayor es la interferencia y el tiempo de interferencia. La vibración interrumpe la concentración y aumenta el tiempo de reacción, siendo la concentración junto a la atención los dos factores cognitivos más importantes entre los componentes de los accidentes en carretera.

Según el Plan nacional de descarbonización, la carbonización de la economía se debe principalmente a la quema de combustibles para impulsar el transporte privado, público y de carga (Gobierno de Costa Rica, Plan de Descarbonización, 2018). Entre el 2000 y el 2010 el valor de las importaciones de petróleo se duplicó frente al PIB y entre 2002 y 2012 el carbono generado por la combustión de gasolina y diésel creció 43% (Gobierno de Costa Rica, Plan de Descarbonización, 2018).

Como fue mencionado al inicio del documento, el sector transporte es responsable del 66% del consumo de hidrocarburos y el 54% de las emisiones de CO₂ de Costa Rica y del total de las emisiones debido a transportes, el 7% es debido directamente al transporte público (MINAE, Plan Nacional de Energía 2015-2030, 2015).

El precio de los combustibles está históricamente en una tendencia al alza. Esto implica que el costo de operación por bus está en constante aumento. Utilizando los costos

del plan piloto realizado en Costa Rica, el costo diario por bus de combustión interna es 6,29 veces más alto que el costo diario de operar un bus eléctrico en la misma ruta (MINAE, Costo diario de buses eléctricos es cinco veces menor a los de diésel, según primeros resultados de plan piloto, 2021).

En un informe realizado en el área metropolitana acerca de la calidad del aire entre 2013 y 2015 se encontró que las emisiones de gases contaminantes emitidas por el sector transporte crece en un 7,4%. Los análisis dados en dicho informe fueron en base a partículas del tipo PM10 y PM2,5. Sobre las PM10 se encontró una concentración entre 17 y 22 microgramos por metro cúbico de promedio anual. Las PM2,5 pueden ingresar hasta la región alveolar y provocar efectos a la salud más severos que los PM10, sin embargo, se indica que en Costa Rica no se cuenta con una normativa que regule la concentración de este contaminante. Esta partícula tiene una concentración máxima recomendada establecida por la Organización Mundial de la Salud en 40 microgramos por metro cúbico, límite el cual es sobrepasado en varios de los puntos de medición del estudio (Ministerio de Salud de Costa Rica, 2016).

En la tabla 1 se puede observar la desviación entre el debiera y la realidad respecto a la problemática de transporte público.

Tabla 1. Tabla de desviación entre debiera y realidad.

		Dato suministrado	Referencia bibliográfica
Debiera	El eje 1 de los 10 ejes para la descarbonización del Plan de Descarbonización establece metas tanto para 2035 como para 2050. Para el periodo 2023-2030 se tiene como meta actuaciones en movilidad sostenible.	En el 2035 el 30% de la flota de transporte público será cero emisiones.	(Gobierno de Costa Rica, Plan de Descarbonización, 2018)
Desviación (Problema)	La flota vehicular de transporte público en Costa Rica es enteramente de motores de combustión interna. En el país solo existe un estudio completo acerca de la implementación de buses eléctricos en dos rutas del Gran Área Metropolitana con información sobre la puesta en operación, recomendaciones técnicas para el escalamiento, kilometraje y consumo de la batería diarios para los buses en ambas rutas. No existe ningún estudio en Costa Rica sobre la implementación de buses eléctricos en rutas interurbanas, lo que implica que no se ha hecho una investigación para ninguna ruta que transite por la Carretera Interamericana Sur, como la ruta que transitan los buses de MUSOC. Por lo tanto, se requieren más estudios que analicen la viabilidad de la implementación de buses eléctricos en el transporte público en otros sectores y rutas aún no analizadas.		
		Dato suministrado	Referencia bibliográfica
Realidad	En Costa Rica solo se ha realizado un plan piloto llevado a cabo en colaboración del gobierno de Costa Rica y Cooperación Alemana GIZ, sin embargo, el 100% de la flota de las empresas autobuseras es de motor de combustión interna.	En 2020 el 0% de los buses fueron 0 emisiones.	(Kruse, 2021) (Gobierno de Costa Rica, Reporte de avances en la implementación del PLAN NACIONAL DE DESCARBONIZACION al 2021, 2022) (RITEVE, 2021)

Nota: Elaboración propia.

Objetivo general

1. Evaluar el rendimiento en términos de energía y costos de un bus eléctrico en comparación a un bus diésel mediante un análisis de costo de ciclo de vida útil que permita la obtención de datos para una toma de decisiones de parte de la empresa de transporte público y los entes reguladores.

Objetivos específicos

1. Analizar los requerimientos de la empresa en términos de las características de los buses de combustión que poseen y su contexto operativo, para una posterior revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado con características similares.

Indicador de logro: Informe con características de los buses de la empresa, buses eléctricos disponibles en el mercado y similitudes de estos a los disponibles en la empresa.

2. Determinar la infraestructura eléctrica requerida y el diseño de la acometida para la alimentación de los buses eléctricos en una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos, basado en el Código eléctrico de Costa Rica.

Indicador de logro: Diseño de la acometida para la alimentación de los buses y cantidad de puestos de carga.

3. Desarrollar un análisis de costo del ciclo de vida útil tanto para el bus eléctrico como para el bus de combustión interna, donde se tomen en cuenta los costos de adquisición, operación, mantenimiento y descarte, que permita la comparación entre ambos.

Indicador de logro: Análisis de costo de ciclo de vida útil, considerando 15 años de operación, de bus eléctrico y de bus de combustión interna en la empresa de transporte público y su respectiva comparativa, además de indicadores financieros de ambos buses (VAN).

4. Establecer el impacto ambiental y a la salud generado por una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en términos de emisiones de gases contaminantes en la empresa de transporte público.

Indicador de logro: Estimación de la cantidad de emisiones de efecto invernadero en toneladas de CO₂ reducidas por el cambio de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en la empresa de transporte público.

Justificación

Se ha encontrado que el cambio de sistema de transporte de combustión interna a buses eléctricos puede reducir los impactos negativos del cambio climático. Esto último debido a que los buses eléctricos tienen un impacto negativo menor que los buses de combustión interna y una huella ambiental menor cuando la electricidad es generada a partir de fuentes de bajas emisiones de carbono o de fuentes renovables (Sunitiyoso, Belgiawan, & Rizki, 2022).

En un estudio acerca del cambio de flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en la ciudad de Shenzhen en China, se estimó que el empleo de buses eléctricos redujo el consumo de energía en un 72,9% en comparación a los buses de diésel (Lin, Zhang, Shen, & Miao, 2019).

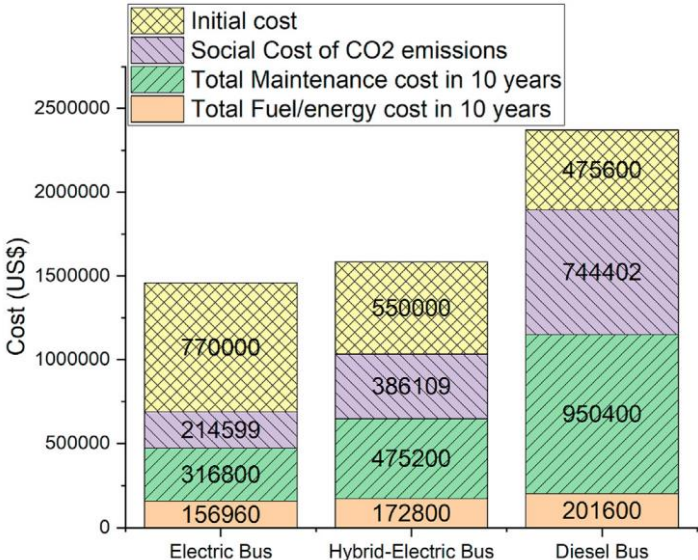
En el plan piloto realizado en cooperación por el gobierno de Costa Rica y Cooperación Alemana para el desarrollo se encontró que tomando en cuenta los costos del combustible con respecto al costo de la electricidad, el costo de operación de los buses eléctricos es entre 5 y 6 veces más económico que el de los buses diésel (Kruse, 2021).

Un bus eléctrico no solo trae reducción en costos de energía, también hay una reducción de relevancia en los costos de mantenimiento en relación con los buses de combustión interna, debido a su eficiente motor eléctrico y su reducción de muchos componentes móviles en el sistema de potencia en relación con el bus de combustión interna (Pagliaro & Meneguzzo, 2019).

En un estudio acerca del impacto de reemplazar flotas de buses de combustión interna con buses eléctricos en África se encontró que el costo de ciclo de vida útil del bus eléctrico es más barato que el del bus híbrido y el del bus de combustión interna, como se distingue en la figura 1. El costo de ciclo de vida del bus de combustión interna a 10 años fue un 62% más alto con respecto al bus eléctrico incluyendo el costo social de las emisiones de CO₂ y un 30% más alto sin incluir este último costo. Este estudio encontró que los costos de mantenimiento a 10 años del bus de combustión interna fueron 200% más altos que los costos del bus eléctrico (Ayetor, Mbonigaba, Sunnu, & Nyantekyi-Kwakye, 2021).

Figura 1.

Desglose de los costos de ciclo de vida para los distintos tipos de buses.

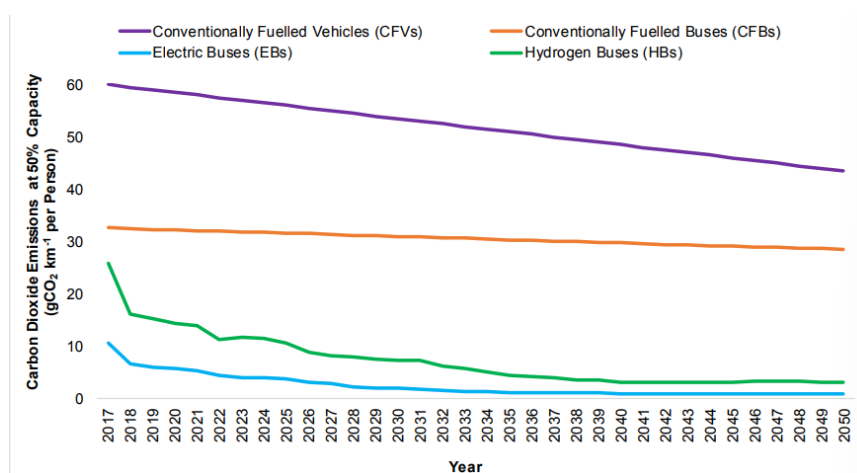


Fuente: (Ayetor, Mbonigaba, Sunnu, & Nyantekyi-Kwakye, 2021).

Sobre la cantidad de emisiones de CO₂, en un estudio sobre la conversión de los vehículos de combustión interna a buses eléctricos en el Reino Unido, se proyectó en base a datos la cantidad de CO₂ por persona que emiten los vehículos y autobuses de combustión interna y eléctricos cuando van a un 50% de capacidad. Como se puede observar en la figura 2, las emisiones de CO₂ por persona de los buses eléctricos son las menores entre los vehículos estudiados (Logan, Nelson, & Hastings, 2020). En dicho estudio se menciona que los buses eléctricos son más suaves en su recorrido y más silenciosos.

Figura 2.

Emisiones de CO₂ proyectadas a 50% de capacidad.



Fuente: (Logan, Nelson, & Hastings, 2020)

En un estudio sobre casos de implementación de buses eléctricos en Suecia e Inglaterra, Aldenius y otros (2022) en una de sus encuestas realizadas encontraron que los conductores que habían manejado un autobús eléctrico preferían manejar uno de estos.

En Costa Rica, solo se ha realizado un plan piloto en dos rutas sobre la viabilidad del uso de buses eléctricos (Gobierno de Costa Rica, Reporte de avances en la implementación del PLAN NACIONAL DE DESCARBONIZACIÓN al 2021, 2022). Esto significa que hay

un alto porcentaje de rutas que no se han explorado ni se han tomado datos sobre el rendimiento del bus eléctrico en estas.

Según lo encontrado en su estudio acerca del costo del ciclo de vida de los buses eléctricos según su método de carga, Lajunen (2018) afirma que, si se consideran 12 años de operación, los buses cuando se cargan cada vez que llegan de nuevo a la estación tienen en promedio un 7% menor el costo de ciclo de vida en relación con los buses diésel. Para el caso de los buses que se cargan por la noche después de su servicio y para los buses que se cargan en las oportunidades de carga, la diferencia en el costo del ciclo de vida es de 26% y 35% respectivamente, en favor del bus eléctrico en relación con el bus de combustión interna.

Viabilidad

Para la ejecución de esta propuesta de análisis de viabilidad se contará con recursos necesarios, tales como: los tipos de buses presentes en la empresa, costos reales de operación y mantenimiento de cada bus, entre otros. La empresa en la que se realizará la propuesta tiene rutas establecidas. Como consecuencia de esto, se podrán realizar comparaciones entre distintos parámetros en las mismas rutas y estudiar el desempeño de los buses.

Alcance

Este trabajo se centrará en la obtención y análisis de datos necesarios para la realización del análisis del ciclo de vida de los buses eléctricos y el de los buses de combustión interna. Dichos datos abarcan rubros de adquisición, operación, mantenimiento y descarte o valor de rescate. Además, se realizará el diseño de una acometida y puesto de carga para buses eléctricos, y se estimará cuántas estaciones de carga son necesarias para la operación. Se estimará el costo de la infraestructura de la acometida para el puesto de carga.

Se abarcará el impacto ambiental en términos de emisiones de los buses de combustión interna y su diferencia al cambiar a flota de buses eléctricos, durante el periodo de operación.

Por todo lo anterior mencionado, este trabajo será de tipo descriptivo y exploratorio.

Limitaciones

El proyecto se llevará a cabo por un solo estudiante, no por un equipo de trabajo, por lo que se desarrollará de manera individual. El practicante no tiene experiencia previa en proyectos de análisis de prefactibilidad como el planteado en este trabajo. Se contará con la ayuda del profesor guía cuando se requiera de esta. También se contará con la colaboración de los técnicos y conductores para la toma y recolección de datos. Los instrumentos necesarios, materiales requeridos y costos asociados a la realización del proyecto se ejecutarán de dinero personal del practicante. El análisis global de este proyecto estará limitado a lo relacionado con la ruta San Isidro de El General – San José y viceversa.

Los datos y estados financieros suministrados por la empresa están sujetos al nivel de confidencialidad que la empresa les otorgue.

Plan de trabajo

En la presente sección se muestra el plan de trabajo propuesto para el proyecto, detallados en la tabla 2 y la figura 3.

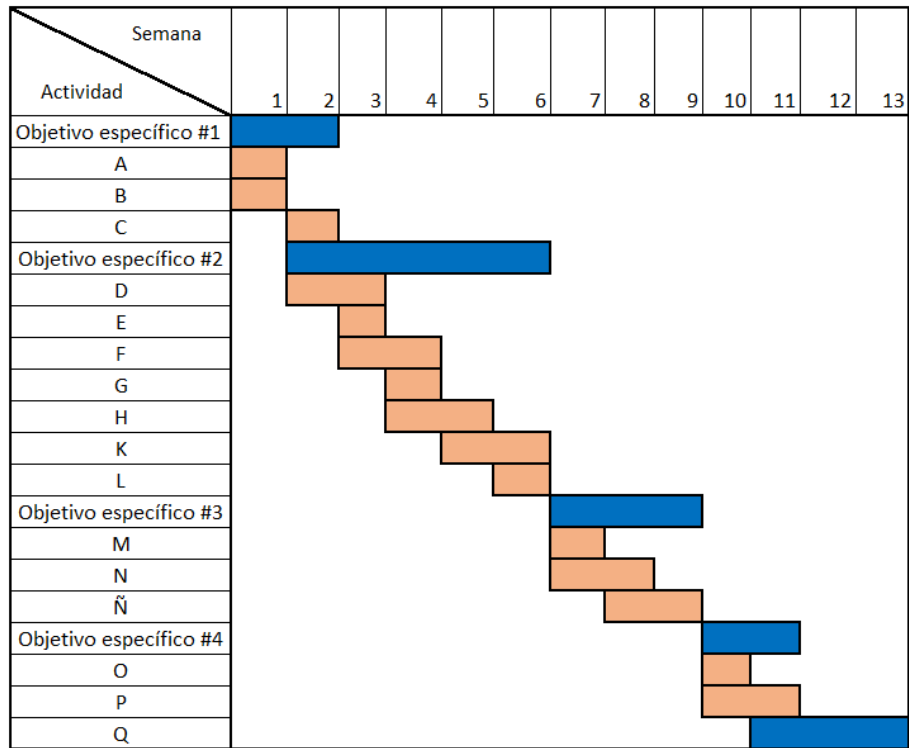
Tabla 2. Actividades por realizar en el proyecto.

Nombre de	Descripción de la actividad	Semana de inicio	Duración (días)	Semana de finalización
A	Recopilación y toma de datos sobre recursos energéticos	1	3	1
B	Realización y ejecución del plan de medición	1	2	1
C	Realización del informe con lo relacionado a uso eficiencia y consumo de energía	2	2	2
D	Recopilación de los costos de operación y mantenimiento de los buses de combustión interna	2	4	3
E	Recopilación de los costos de operación y mantenimiento de los buses eléctricos	3	4	3
F	Creación de curvas de mantenimiento de ambos tipos de buses	3	2	4
G	Organización de los costos de operación y mantenimiento para ambos tipos de buses	4	3	4
H	Determinar el costo de descarte de ambos tipos de buses	4	3	5
K	Realización del análisis de costo de ciclo de vida útil para ambos tipos de buses	5	5	6
L	Análisis de los resultados obtenidos	6	3	6
M	Análisis de la demanda requerida para abastecer la flota de buses eléctricos	7	2	7
N	Investigación sobre las estaciones de carga para	7	5	8
Ñ	Realización del diseño de la acometida y el cálculo de la cantidad de alimentadores	8	8	9
O	Estimación de las emisiones de CO2 producidas por ambos tipos de buses y por las fuentes de energía eléctrica	10	4	10
P	Análisis de los resultados obtenidos	10	2	11
Q	Redacción del informe final	11	12	13

Nota: Elaboración propia.

Figura 3.

Diagrama de Gantt.



Nota: Elaboración propia.

Capítulo 2. Marco metodológico

Metodología planteada

En la presente sección se muestra la metodología propuesta del proyecto, detallada en la tabla 3.

Tabla 3. Metodología del proyecto.

Objetivo específico planteado	Actividad por realizar	Fuente de información	Análisis de datos con criterios estadísticos.	Resultados esperados (Entregables)
Objetivo específico # 1:	Análisis de los requerimientos de la empresa en términos de características de los buses de combustión que poseen para una posterior revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado con características similares.	Documentación de la empresa, catálogos de ventas de buses eléctricos.	Análisis de las capacidades de transporte de pasajeros, autonomía, torque requerido, tiempo de recarga y demás características pertinentes.	Analizar los requerimientos de la empresa en términos de características de los buses de combustión que poseen para una posterior revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado con características similares.
Objetivo específico # 2:	Determinación de la infraestructura eléctrica requerida y el diseño de la acometida para la alimentación de los buses eléctricos en una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos.	Documentación de la empresa, Plan piloto GIZ-ICE, Código Eléctrico Nacional, papers.	Análisis de la demanda eléctrica requerida para el abastecimiento de las baterías de la eventual flota de buses eléctricos.	Diseño de la acometida para la alimentación de los buses y cantidad de puestos de carga.
Objetivo específico # 3:	Desarrollo de un análisis de costo de ciclo de vida útil tanto para el bus eléctrico como para el bus de combustión interna, donde se tomen en cuenta los costos relacionados a adquisición, operación, mantenimiento y descarte.	Documentación de la empresa, papers.	Análisis de costos de adquisición, operación, mantenimiento y descarte. TCO y VAN de los costos de ambos tipos de buses.	Análisis de costo de ciclo de vida útil, considerando 15 años de operación, de bus eléctrico y de bus de combustión interna en la empresa de transporte público y su respectiva comparativa, además de indicadores financieros de ambos buses (TCO, VAN de costos).
Objetivo específico # 4:	Establecimiento del impacto ambiental y a la salud generado por una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en términos de emisiones de gases contaminantes en la empresa de transporte público.	Documentación de la empresa, mediciones y papers.	Cálculo de las emisiones de CO ₂ actuales de los buses de combustión interna.	Estimación de la cantidad de emisiones de efecto invernadero en toneladas de CO ₂ reducidas por el cambio de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en la empresa de transporte público.

Nota: Elaboración propia.

Capítulo 3. Marco teórico

1. Plan de Descarbonización

El Gobierno de Costa Rica (2018) en su Plan de Descarbonización busca contar con una economía descarbonizada para 2050, donde el nivel de emisiones sea el más bajo posible, de forma consistente con la meta climática global de un incremento máximo de 2°C (idealmente 1,5°C) con respecto a los niveles preindustriales.

El Plan de Descarbonización está compuesto por 10 ejes principales, de los cuales el primer eje está centrado en el desarrollo de un sistema de movilidad basado en transporte público seguro, eficiente y renovable. Los 10 ejes trazan rutas de cambio en áreas estratégicas para revertir el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero, así como incentivar la modernización y dinamización de la economía bajo una visión de crecimiento verde. El Plan de Descarbonización también está compuesto por 8 estrategias transversales que buscan consolidar el proceso de cambio, mediante ajustes en la institucionalidad, el marco fiscal y el sistema educativo, con consideraciones sociales, financieras, ambientales y tecnológicas (Gobierno de Costa Rica, Plan de Descarbonización, 2018).

2. Plan Nacional de Energía 2015-2030

El Plan Nacional de Energía 2015-2030 busca introducir cambios en el Sistema Eléctrico Nacional que permitan elevar la eficiencia energética, el ahorro y lograr un mejor manejo de la demanda eléctrica, estimular el desarrollo de la generación distribuida y el autoconsumo de electricidad, actualizar el marco jurídico e institucional en pro de la eficiencia energética, mejorar los métodos de cálculo de las tarifas eléctricas y elevar la

eficiencia de la gestión de las entidades públicas del sector electricidad (MINAE, Plan Nacional de Energía 2015-2030, 2015).

El plan también considera las siguientes orientaciones relacionadas con el sector transporte: promover sistemas eficientes de transporte público que sean ambientalmente más limpios y mitiguen los efectos del calentamiento global, promover el uso de combustibles alternativos en el sistema de transporte para disminuir la dependencia de los hidrocarburos y la emisión de gases contaminantes y mejorar las normas para la importación de vehículos para estimular el rendimiento energético y la reducción de la contaminación (MINAE, Plan Nacional de Energía 2015-2030, 2015).

3. Valor actual neto (VAN)

El valor actual neto, denominado como VAN, es el valor que resulta de la diferencia entre el desembolso inicial de la inversión (FF_0) y el valor presente de los futuros ingresos netos esperados (FF_j) (Dumrauf, 2003). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$VAN = -FF_0 + \frac{FF_1}{(1+k)^1} + \frac{FF_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FF_n}{(1+k)^n} \quad (1)$$

Donde:

- FF_0 = Inversión inicial del proyecto
- FF = Flujo neto de efectivo de un periodo
- k = tasa de descuento

El VAN puede indicar si un proyecto es o no rentable bajo el siguiente criterio:

- $VAN < 0$: El proyecto, al periodo del último flujo neto de efectivo, no será rentable.

- $VAN = 0$: El proyecto, al periodo del último flujo neto de efectivo, no producirá ganancias ni pérdidas. El proyecto recuperará su inversión inicial sin producir ganancias.
- $VAN > 0$: El Proyecto, al periodo del último flujo neto de efectivo, recuperará la inversión inicial y producirá ganancias.

4. Transporte público

El transporte público, también denominado transporte de masas, es un sistema integral de servicio público que moviliza masivamente a la población, capaz de dar solución a la necesidad humana de desplazarse. A diferencia del transporte privado, el usuario no opera el vehículo ni se hace cargo de sus costos (Ortega, 2018).

5. Vehículo cero emisiones

Vehículo que no produce emisiones en la fuente de energía a bordo (Gobierno de Costa Rica, Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030, 2018).

6. Baterías para vehículo eléctrico

Corresponde a la celda o conjunto de celdas que conforman el paquete acumulador de energía eléctrica, según los requerimientos técnicos del fabricante del vehículo eléctrico (Gobierno de Costa Rica, Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030, 2018). Entre los tipos de baterías eléctricas presentes en el mercado, la batería de ion de litio es la batería en más rápido desarrollo y ha probado ser el componente más prometedor en el almacenamiento de energía (Liu, Song, Li, Liao, & Peng, 2018).

7. Buses eléctricos de baterías

Un bus eléctrico de baterías (BEB) es un bus impulsado por un motor eléctrico, que almacena su energía en baterías eléctricas en lugar de en un tanque de combustible (Du, y otros, 2019). Un bus eléctrico difiere de un bus de combustión interna en su conjunto de sistemas y componentes que entregan tracción al vehículo (Becerra, y otros, 2020). Un bus eléctrico es un vehículo automotor destinado al transporte masivo de personas, cuya capacidad sea para más de cuarenta y cuatro pasajeros sentados, independientemente de los pasajeros de pie que pueda transportar (Gobierno de Costa Rica, Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030, 2018).

8. Centro de recarga

Estación de suministro o comercialización eléctrica para la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos. Poseen al menos un dispensador de energía eléctrica que puede ser del tipo estación, en poste, empotrado o parche y se clasifican en centros de recarga lento, semi rápido y rápido. Su funcionamiento se rige por los estándares internacionales de acuerdo con las normas técnicas: INTE/IEC 61851-1 “Requisitos generales” INTE/IEC 61851-22 “Estación de carga en corriente alterna para vehículos eléctrico” e INTE/IEC 61851-23 “Estación de carga en corriente continua para vehículos eléctricos”, respectivamente (Gobierno de Costa Rica, Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030, 2018).

9. Análisis de costo de ciclo de vida útil

Metodología desarrollada para evaluar cómo varían los costos de un activo en su ciclo de vida útil.

10. Costo total de propiedad (TCO)

El costo total de propiedad (TCO) considera los costos de adquisición, uso, administración, mantenimiento y descarte de un cierto activo o servicio. El TCO no requiere un cálculo preciso de sus costos, pero sí enfocarse en los costos mayores y los costos relevantes (Ellram, 2002). La fórmula de cálculo del TCO se presenta a continuación (Romero & Ramírez, 2020):

$$TCO = C_{bus} + C_{bat} + C_{car} + C_{ter} + C_{cap} \quad (2)$$
$$+ \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{Ce_i}{(1+r)^i} + \frac{Cs_i}{(1+r)^i} + \frac{Cm_i}{(1+r)^i} + \frac{Camb_i}{(1+r)^i} + \frac{Ch_i}{(1+r)^i} \right) \right]$$
$$- \frac{Vr_{bat}}{(1+r)^n} - \frac{Vr_{bus}}{(1+r)^n}$$

Donde:

- C_{bus} : Costo de compra del bus
- C_{bat} : Costo de compra de las baterías
- C_{car} : Costo de compra de los cargadores
- C_{ter} : Costo de compra del terminal
- C_{cap} : Costo de capacitación
- Ce : Costo de la energía
- Cs : Costo de operación fijo
- Cm : Costo del mantenimiento
- $Camb$: Costo ambientales
- Ch : Costos de salud
- Vr_{bat} : Valor residual de las baterías

- $Vrbus$: Valor residual del bus
- n : cantidad de años estimados de la vida útil del activo
- r : tasa de descuento o tasa de interés

11. Calidad del aire

La suma de las características relacionadas entre sí del estado del aire exterior. Se califica normalmente como buena o mala, según el índice de contaminación establecido (Gobierno de Costa Rica, Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030, 2018).

12. Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación r de Pearson mide el grado de asociación lineal entre dos variables. Dicho valor r puede situarse entre -1 y 1 , donde 0 sería la ausencia de relación mientras que entre más cerca de los extremos del rango significa una correlación más fuerte. El valor absoluto de coeficiente r en porcentaje significa la cantidad de variabilidad de los valores de x que se pueden explicar debido a y (Fallas, 2012).

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{s_x} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{s_y} \right) \quad (3)$$

Donde:

- n : cantidad de datos
- X_i : dato de la columna x en la posición i
- Y_i : dato de la columna y en la posición i
- \bar{X} : media de x
- \bar{Y} : media de y
- s_x : desviación estándar de x

- s_y : desviación estándar de y

Capítulo 4. Análisis de resultados

Objetivo 1.

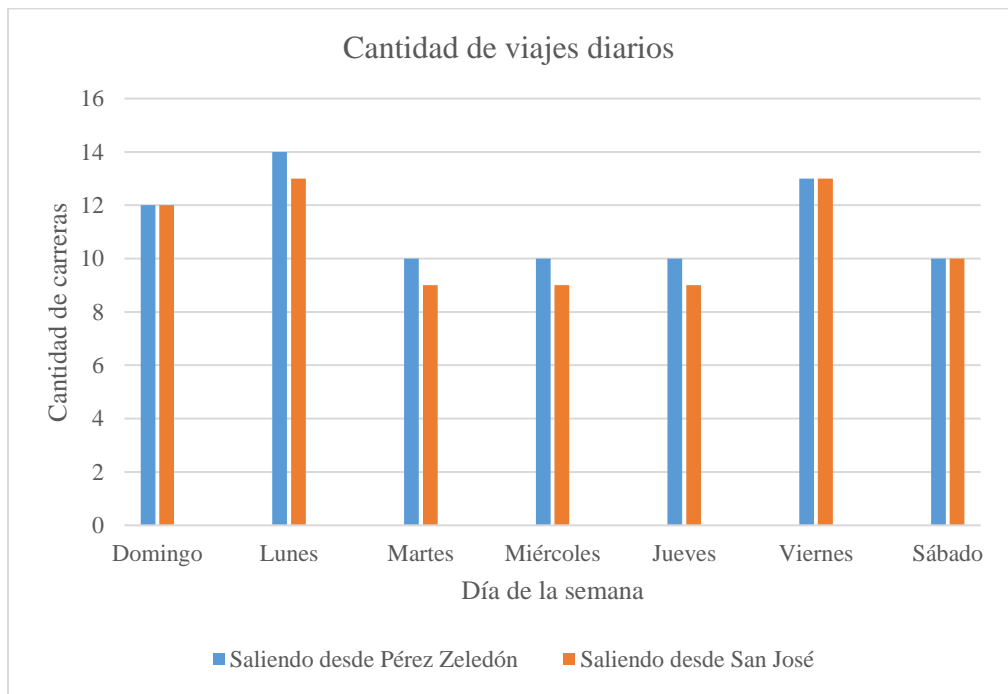
Analizar los requerimientos de la empresa en términos de las características de los buses de combustión que poseen y su contexto operativo, para una posterior revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado con características similares.

Características operativas

Para el análisis adecuado de los requerimientos de la empresa, fue importante tener en cuenta el contexto operativo de los buses. Los horarios de la ruta San Isidro de El General – San José varía dependiendo del día y de la demanda. En la figura 4 se muestra la cantidad de viajes realizados por día de la semana en horario regular, en el cual MUSOC realiza un total de 154 viajes a la semana, siendo el lunes el día con más viajes con 27. Dichos 27 viajes se pueden cubrir con un mínimo de 8 buses, no obstante, diariamente circulan entre 10 a 12 buses, con excepción de las fechas donde la demanda es máxima, en cuyo caso circula la totalidad de la flotilla la cual consta de 18 buses. Dichas fechas son el primero de enero, la semana santa, el día de la madre, y los días 24, 25 y 31 de diciembre, en donde aproximadamente salen un 50% más de carreras en esos días.

Figura 4.

Gráfico de cantidad de viajes diarios según su destino.



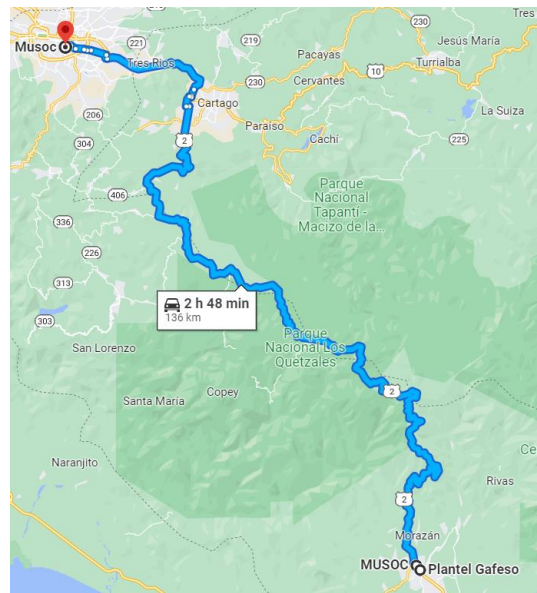
Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Al inicio del día, los buses que salen de Pérez Zeledón salen del plantel de Gafeso y van a la terminal de San Isidro de El General, donde recogen a los pasajeros, para después salir hacia la terminal de San José, transitando por la Carretera Interamericana Sur (Ruta 2) en su mayoría. Los buses que al inicio del día salen de San José, salen de la terminal de San José a la terminal de San Isidro de El General, siguiendo el mismo camino de los buses que vienen en dirección contraria. La ruta de terminal a terminal es de 135 km, sumándole el tramo de la terminal de San Isidro de El General al plantel de Gafeso son 136 km, como se observa en la figura 5. Cuando la Ruta Interamericana Sur está cerrada en su totalidad en puntos que impidan utilizar una ruta alterna pero que se derive de la Ruta 2, se hace el recorrido empleando la Costanera Sur y la Ruta 27, la cual se aprecia en la figura 6. Este

desvío es la ruta más larga que pueden llegar a recorrer los buses en un solo sentido, llegando a los 239 km.

Figura 5.

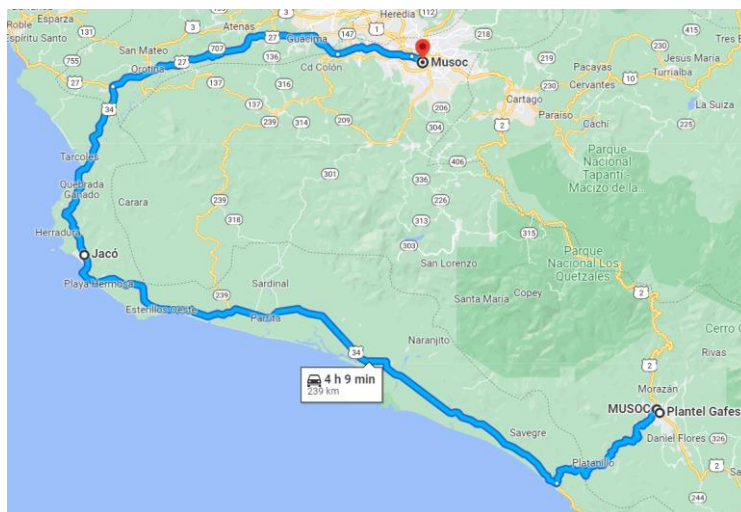
Ruta habitual de los buses de MUSOC.



Nota: imagen obtenida de Google Maps.

Figura 6.

Ruta alternativa de los buses de MUSOC.



Nota: imagen obtenida de Google Maps.

Figura 7.

Perfil de elevación de la ruta de la figura 5 (el punto izquierdo corresponde a la terminal de San José y el derecho al plantel de Gafeso).



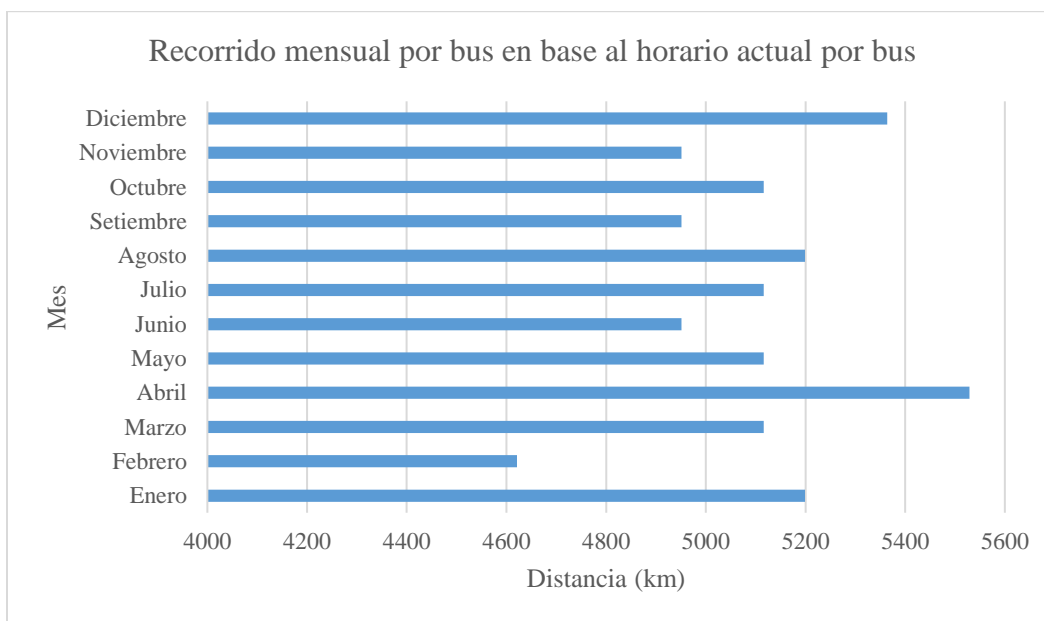
Nota: imagen obtenida de Google Maps.

Cabe destacar que la pendiente máxima a vencer del recorrido es de 17,5%, medida en Google Maps, mismo programa del que se obtuvo el perfil de elevación de la figura 7.

Contando con un recorrido de 135 km entre terminal y terminal y sabiendo el número de carreras por día en horario regular y tomando en cuenta las fechas de máxima demanda, se puede obtener un estimado del número de kilómetros recorridos por bus cada mes, los cuales se muestran en la siguiente figura.

Figura 8.

Recorrido mensual por bus acorde al horario regular actual, contemplando fechas de alta demanda.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

En la figura 8 destacan los meses de abril y diciembre como los dos meses con más kilómetros recorridos por bus, esto debido a que son los meses que más fechas de alta demanda contienen. Febrero también destaca como el mes con menos kilómetros recorridos por bus debido a que es el mes más corto y a que no contiene fechas de alta demanda. A partir de los datos de la figura 8, se obtiene un recorrido anual por bus de 61230,25 km.

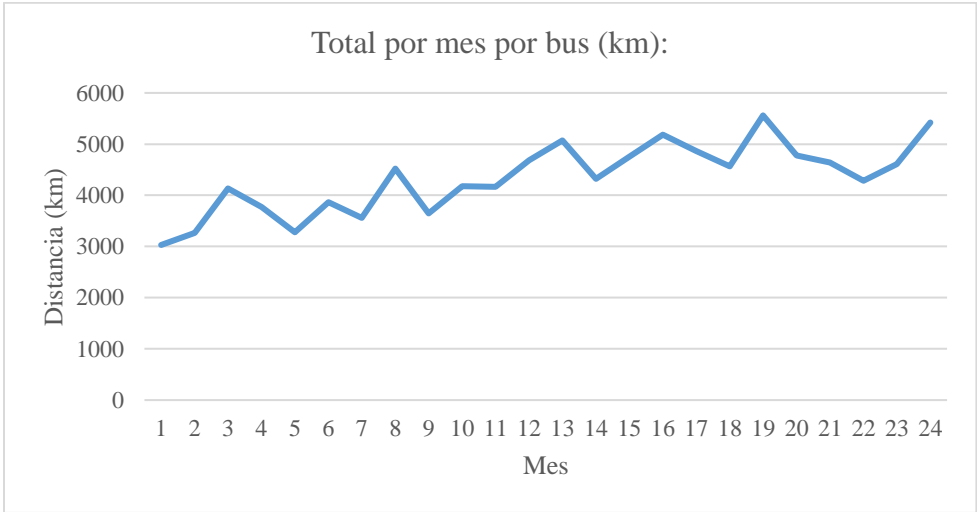
El horario actual difiere del horario de los últimos 3 años, debido a las consecuencias de la pandemia del covid-19 en el transporte público. En la figura 9 se observan la cantidad de kilómetros recorridos en promedio por mes por bus a lo largo de 2021 y 2022. Debido a que no se lleva una cuenta individual de los kilometrajes de los autobuses a lo largo del tiempo, se tomó como referencia una semana por cada mes de ambos años para recolectar información sobre las carreras realizadas por días, y se utilizó dicha muestra para representar

el recorrido total de ese mes. Una vez obtenidas las carreras totales se distribuyeron entre los 18 buses. En la figura 9 se puede observar una tendencia al aumento de los kilómetros por mes en los buses, influenciada en parte por la reducción de restricciones en el sector del transporte público.

En la figura 10 se puede ver el histórico de viajes diarios tomados de una muestra de una semana por mes en un periodo de 24 meses que abarcan desde enero de 2021 a diciembre de 2022. En dicho gráfico se observa como a partir del mes 12 (diciembre de 2021) los lunes, viernes y domingo destacan por sobre el resto de los días de la semana siendo los días de más carreras con excepción del mes 19 (Julio 2022) donde el sábado fue más concurrido en carreras que el domingo.

Figura 9.

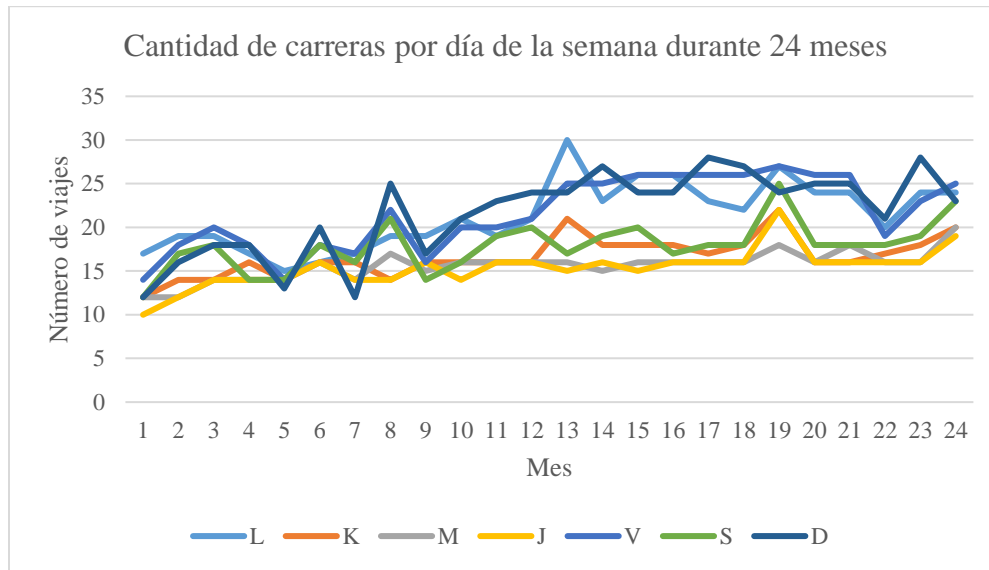
Recorrido mensual por bus en el periodo de 2021 y 2022



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Figura 10.

Gráfico de series temporales de la cantidad de carreras por día de la semana durante 24 meses



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Características de los buses actuales

MUSOC cuenta actualmente con 18 unidades de autobuses, de dos marcas distintas de carrocería. Ocho buses tienen nueve años de antigüedad y diez buses tienen cinco años de antigüedad. Ambos tipos de buses cuentan con capacidad de transporte de 55 pasajeros más el conductor. En la tabla 4 y la figura 11 se detallan características de la flota y los buses.

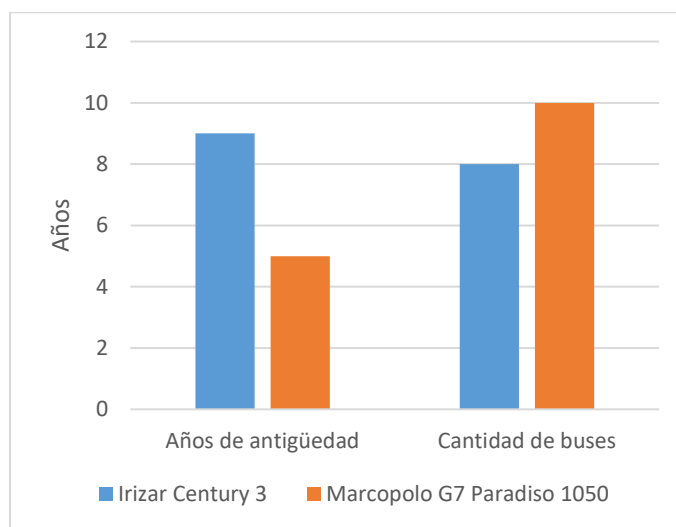
Tabla 4. Características y cantidad de buses por marca.

Marca/Modelo del motor de los buses diésel	Marca/Modelo del chasis de los buses diésel	Marca/Modelo de la carrocería de los buses diésel	Años de antigüedad de los buses diésel	Cantidad de buses
Mercedes Benz OM 457	Mercedes Benz O 500	Irizar Century 3	9	8
Scania DC13	Scania K 360 6x2	Marcopolo G7 Paradiso 1050	5	10

Nota: Elaboración propia.

Figura 11.

Años de antigüedad y cantidad de buses por marca.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

De los modelos de buses que posee MUSOC, el motor de los buses con carrocería Irizar Century 3 genera un torque de 1600 Nm y el motor de los buses con carrocería Marcopolo G7 Paradiso 1050 genera 1850 Nm (Mercedes-Benz Bus) (Scania, 2018). A partir de este momento del documento se le llamará “bus tipo MB” a los buses de la flota actual de

MUSOC con carrocería Irizar Century 3 y “bus tipo Scania” a los buses con carrocería Marcopolo G7 Paradiso 1050.

En conversaciones con la empresa, se llegó a la conclusión de analizar la viabilidad del cambio de los 8 buses tipo MB, debido a que son los más próximos a cumplir los 15 años de utilidad operativa que planea darles MUSOC.

Revisión de la oferta de buses eléctricos

Una vez comprendidos los buses actuales de la empresa y su contexto operativo, se procedió a realizar un análisis del mercado de los buses eléctricos para rutas interurbanas. Dicho análisis sirvió para hacer la selección final del modelo de bus para el cual se diseñará la infraestructura eléctrica y se realizará el análisis de costo de ciclo de vida útil. Para empezar una preselección de buses, se tuvieron en cuenta requisitos mínimos. Dichos requerimientos fueron: el número de asientos debe ser lo más acorde al número actual y el bus debe tener autonomía suficiente para hacer la ruta habitual ida y vuelta iniciando en cualquiera de las terminales. Los modelos de buses seleccionados fueron tabulados en la tabla 5.

Tabla 5. Características de los buses preseleccionados.

Marca	Modelo	Cantidad de asientos	Almacenaje de la batería (KWh)	Torque máximo (Nm)	Torque nominal (Nm)	Distancia de autonomía descrita (Km)	Máximo peso de operación (Kg)	Peso en vacío (Kg)
Yutong	ICE 12	59+1+1	350	2400	1200	320	19700	13300
Yutong	T12E	51+1+1	422					
Yutong	ZK6127BEV	50	350		1260	325	18000	13220
BYD	C10M	57+1	446	1500		370		19500
BYD	C10MS	77+1	446	1500		370		21319
MCI	J4500 Charge	56	544	4500		262-375	24495	20500
MCI	D45 CRT LE Charge	54	520	4500		251-402	24495	20000
MCI	D45 CRT Charge	57+2	520	4500		251-402	24495	19500
TEMSA	LD SB E	59	280			280		19000
Van Hool	CX45E	56	676	4240		450		20000

Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

De la preselección de buses se obtuvieron 10 modelos distintos, pertenecientes a 5 marcas diferentes. Las marcas de dichos buses eléctricos fueron: Yutong, BYD, MCI, TEMSA y Van Hool. A todas las marcas se les contactó para pedir una cotización de todos los modelos, no obstante, solo se obtuvo el precio para dos modelos, el Yutong ZK6127BEV y el Van Hool CX45E. En Costa Rica, a la fecha de redacción del presente documento, solo BYD y Yutong cuentan con representación en suelo nacional. En los contactos que hubo con las distintas empresas, solo Yutong afirmó tener la capacidad de suplir rápidamente repuestos necesarios, debido a su representación en Costa Rica y Latinoamérica.

Por las razones antes dadas y con el consentimiento de la empresa, el modelo de bus eléctrico interurbano ZK6127BEV de Yutong, es elegido para su análisis de viabilidad en la empresa MUSOC. Más características sobre dicho bus se encuentran en el **anexo 1**.

Objetivo 2.

Determinar la infraestructura eléctrica requerida y el diseño de la acometida para la alimentación de los buses eléctricos en una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos, basado en el Código eléctrico de Costa Rica.

Diseño de la infraestructura eléctrica

En cuanto al diseño de la infraestructura eléctrica para la alimentación de los cargadores de los buses eléctricos, se tuvieron en cuenta los requerimientos y necesidades operativas de la empresa. El modelo de cargador a utilizar será un Yutong SZ-160 de carga dual, lo que significa que los 8 buses que la empresa desea analizar su cambio a buses eléctricos pueden ser abastecidos con un mínimo de 4 cargadores. Las características de dicho cargador se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6. Características del cargador Yutong SZ-160 de estándar chino con carga simultánea.

Voltaje de entrada trifásico AC (V)	480
Potencia (kW)	160
Corriente de entrada (A)	194,4
Número de pistolas	2
Frecuencia de red de AC (Hz)	45-65
Factor de potencia	$\geq 0,99$ ($P \geq 50\%$)

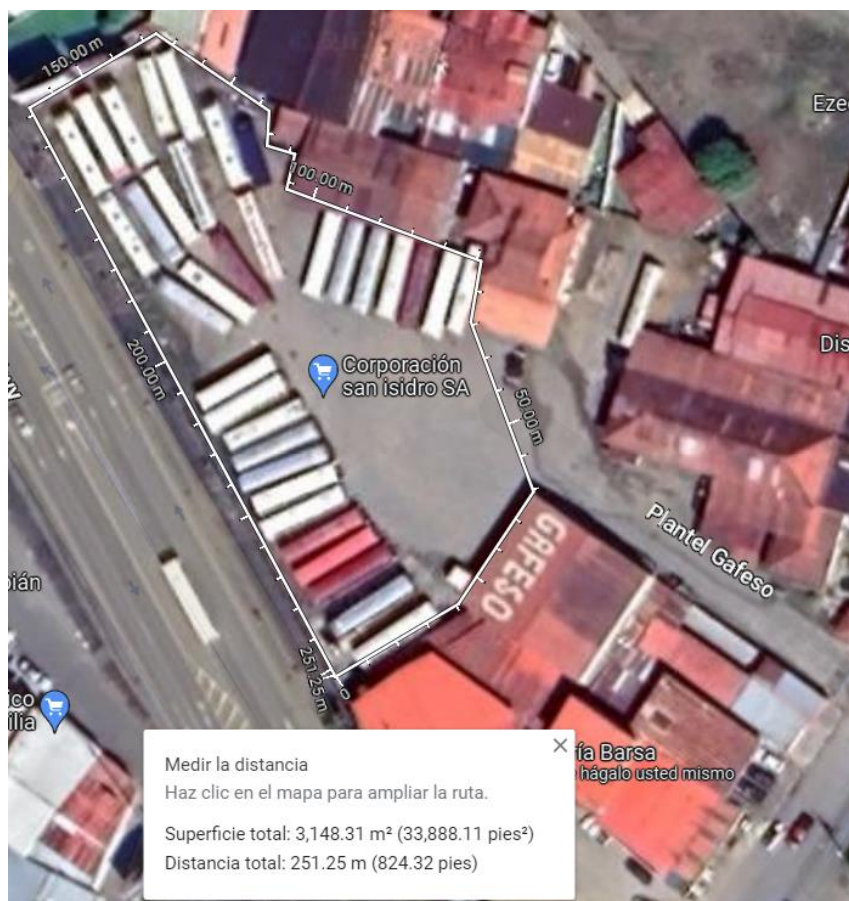
Nota: Datos brindados por Yutong, 2023.

Una vez obtenida la información del cargador a utilizar, se procedió a realizar una estimación de la disposición espacial que tendrían dichos cargadores en el plantel. Esto con el fin de obtener las distancias estimadas de los cables conductores de corriente eléctrica para

poder hacer el cálculo de los porcentajes de caída de voltaje. Para lograr dicho cometido, se obtuvo una imagen satelital del plantel Gafeso, donde se cargarían los buses de MUSOC. Los buses eléctricos se estacionarían perpendicular a la Carretera Interamericana Sur, con la cual tienen un aproximado de 92 metros de frente a calle. Los 8 buses colocados uno al lado del otro, con un espaciamiento de aproximadamente 1,42 m entre ellos ocuparían 30,4 m en total, por lo que dicha disposición en el lugar seleccionado tendría espacio suficiente para ser colocada.

Figura 12.

Vista satelital del plantel del Grupo Gafeso MUSOC en San Isidro de El General, para obtener el área utilizable de estacionamiento de buses.



Nota imagen obtenida de Google Maps.

En la figura 13 se puede ver el cómo se esquematizó el acomodo espacial de la infraestructura eléctrica. La sección que muestra dicha imagen es la parte inferior del frente a calle de la figura 12. La simbología de la figura 13 es la siguiente:

TP: Tablero principal

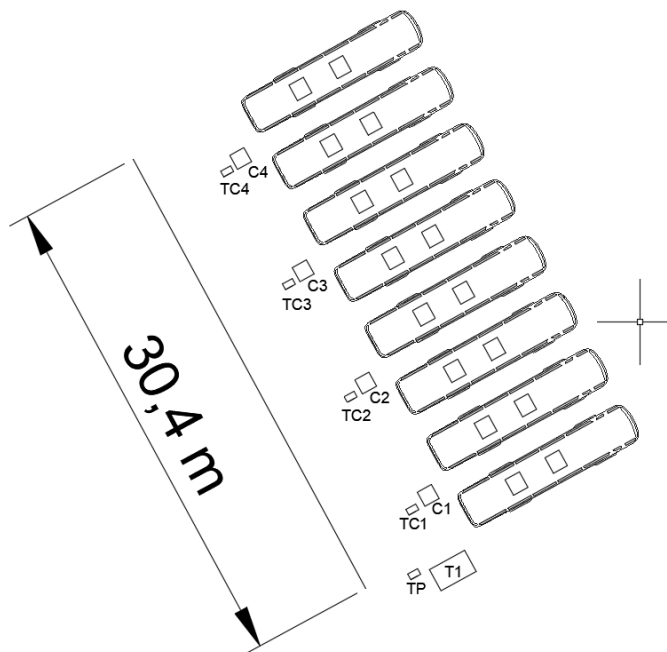
T1: Transformador principal de 750 kVA

TC1, TC2, TC3, TC4: Tableros de los cargadores

C1, C2, C3, C4: Cargadores de los buses eléctricos

Figura 13.

Configuración espacial de la parte visible de la instalación eléctrica.



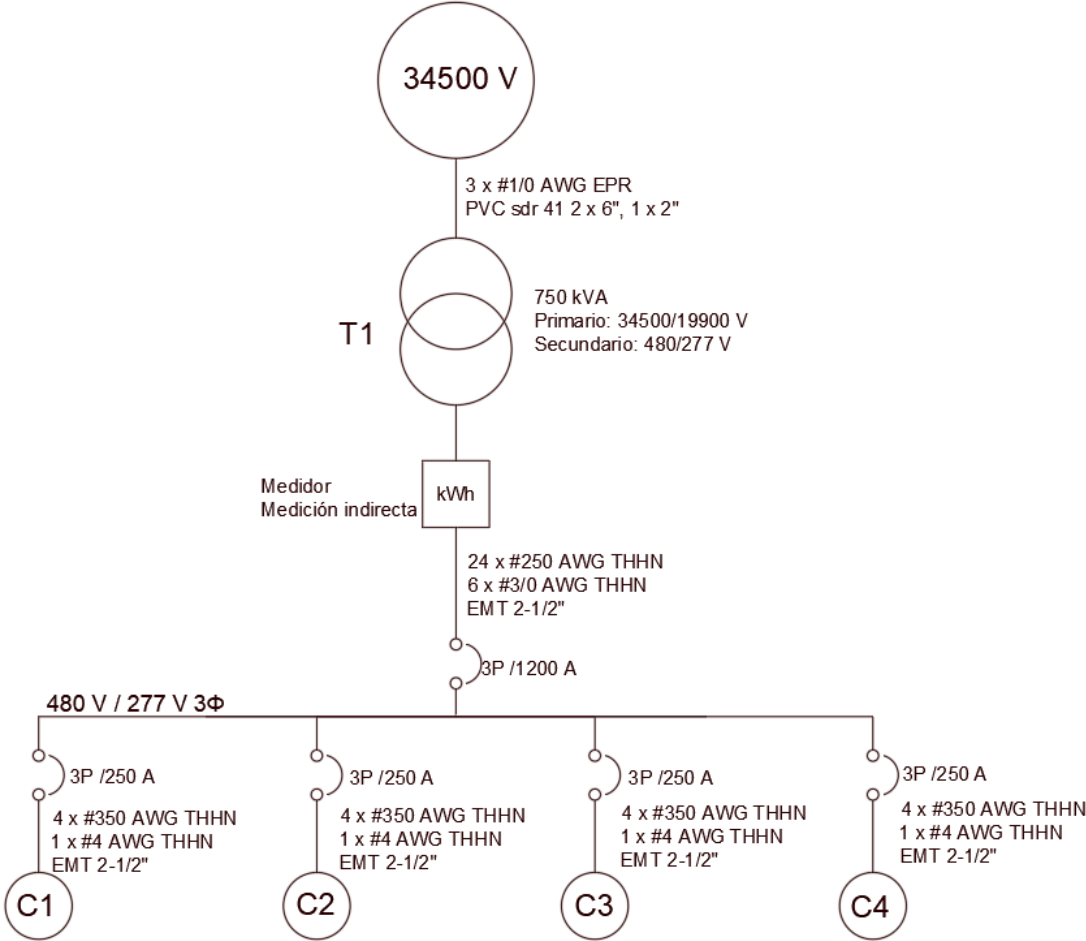
Nota: Elaboración propia en AutoCAD.

El diseño de la infraestructura eléctrica requerida para los 4 cargadores fue basado en el código eléctrico de la NFPA (Asociación Nacional de Protección contra Incendios), el

NEC (Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA), 2020) y en el Manual para Redes Eléctricas de Distribución Subterránea (Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales (CIEMI), 2021). La memoria de cálculo se encuentra ubicada en el **apéndice 1** donde se puede ubicar cálculos y dimensionamientos de calibres de conductores, disyuntores, ductos, corrientes de diseño y porcentajes de caídas de voltaje.

Figura 14.

Diagrama unifilar de la infraestructura eléctrica propuesta para la alimentación de 4 cargadores Yutong SZ-160.



Nota: Elaboración propia en AutoCAD.

En el diagrama unifilar de la figura 14 se observa el calibre del tendido de mediana tensión, donde el calibre seleccionado es el calibre mínimo para conductores a 34500V. La instalación de la conexión a la red de media tensión al transformador lleva la colocación de un poste en el recinto del plantel de Gafeso, en donde se redirigirán los conductores de mediana tensión al transformador en un esquema de transmisión aero-subterráneo.

Para el cálculo de la corriente de selección de conductores en los ramales, se aplicaron distintos factores de castigo, tales como el factor de castigo por carga continua (1,25) y el factor de castigo por agrupación (0,8) debido a que van 4 conductores portadores de corriente por ducto en el circuito ramal. El cálculo de dicha corriente es el siguiente:

$$I_D = \frac{I_L * FC \text{ carga continua}}{FC \text{ agrupación}} \quad (4)$$

Ya que todos los circuitos ramales presentan la misma carga, se concluye que con obtener una corriente de diseño por circuito ramal y obtener su calibre correspondiente, todos los circuitos ramales restantes portarían la misma corriente de diseño y utilizarían el mismo calibre del conductor. Para obtener dicha corriente, se sustituye los valores correspondientes en la ecuación 4:

$$I_D = \frac{194,39 * 1,25}{0,8} = 303,74 \text{ A}$$

Con dicha corriente se dimensionó el calibre de los conductores de las líneas de los circuitos ramales, el cual fue de #350 AWG THHN.

También, los ductos de los circuitos ramales de 2-1/2", a pesar de estar seleccionados en base al mínimo tamaño comercial aceptable para las condiciones dadas, utilizar ductos de

3" también sería una opción para considerar debido a la facilidad de instalación que provee el espacio sobrante de más al subir de área transversal.

Objetivo 3.

Desarrollar un análisis de costo de ciclo de vida útil tanto para el bus eléctrico como para el bus de combustión interna, donde se tomen en cuenta los costos de adquisición, operación, mantenimiento y descarte, que permita la comparación entre ambos.

En el presente capítulo se desarrolla un análisis de costo del ciclo de vida útil de las flotas de los buses actuales para analizar su sustitución (bus tipo MB), tanto como de los buses seleccionados para estudiar su ingreso a la flotilla, los cuales serían un modelo eléctrico (Yutong ZK6127BEV) y un modelo diésel nuevo. Se analizaron los costos de los tres tipos de buses antes mencionados en sus 4 etapas del ciclo de vida útil, las cuales son: adquisición, mantenimiento, operación y descarte. Dicho análisis permitió realizar un TCO de cada tipo de flota de buses.

Todas las conversiones de dólares a colones se harán con el tipo de cambio de venta de dólares, con referencia del Banco Central de Costa Rica a la fecha de 25 de abril de 2023, el cual es de ₡ 536,64 por dólar.

Buses actuales (Bus tipo MB)

El análisis de los buses de motor y carrocería Mercedes Benz se sustenta en base a dos años de datos disponibles en las oficinas de MUSOC acerca de sus gastos relacionados a mantenimiento y combustibles.

Costo de adquisición

El costo de adquisición de los buses tipo MB no fue registrado en las bases de datos de MUSOC al momento de su compra en 2014 ni posteriormente. Se estima que dicho precio

de adquisición rondó los \$ **200 000** por bus, de acuerdo con las afirmaciones del responsable de mantenimiento.

Costo de mantenimiento

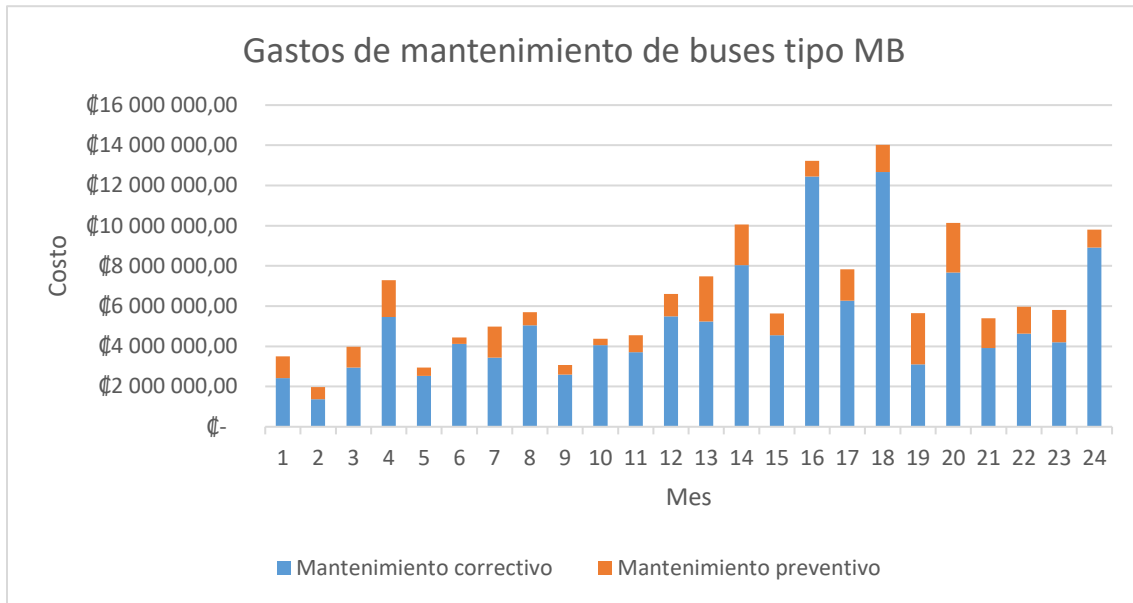
Debido a que no se lleva un seguimiento individualizado por bus de sus respectivos costos e intervenciones de mantenimiento, se utilizó el siguiente procedimiento para adjudicar los gastos de mantenimiento preventivo y correctivo a los dos tipos de buses presentes en la flotilla actual de MUSOC:

Se revisó individualmente todas las facturas relacionadas a mantenimiento y si dicha factura indicaba el tipo de bus al que iba enfocada o alguna de sus partes se le colocaba la factura al tipo de bus. En el caso de que las facturas no dieran pista de a qué tipo de bus referenciaban, se acumulaban como facturas no adjudicadas. Una vez recopiladas todas las facturas y dispuestas por tipo de bus, se subdividió en facturas de tipo de mantenimiento preventivo y facturas de mantenimiento correctivo. En las facturas de mantenimiento preventivo corresponden a las acciones preventivas aplicadas en el taller de MUSOC a los autobuses. Aunque no se lleve registro específico de dichas intervenciones, acorde al encargado de mantenimiento de la empresa y a charlas con técnicos, las acciones preventivas son las siguientes: cambios de fajas, cambio de tuberías y mangueras, cambio de refrigerantes, engrases, cambios de filtros de aire, aceites y combustibles, reencauches de llantas y cambios de aceite. Cualquier otra factura de mantenimiento que no sea relacionada con los procedimientos anteriores se toma como un costo de mantenimiento correctivo.

Una vez distribuidos los costos, se obtuvo la totalidad de los costos por tipo de bus, los cuales fueron graficados en las figuras 15 y 16.

Figura 15.

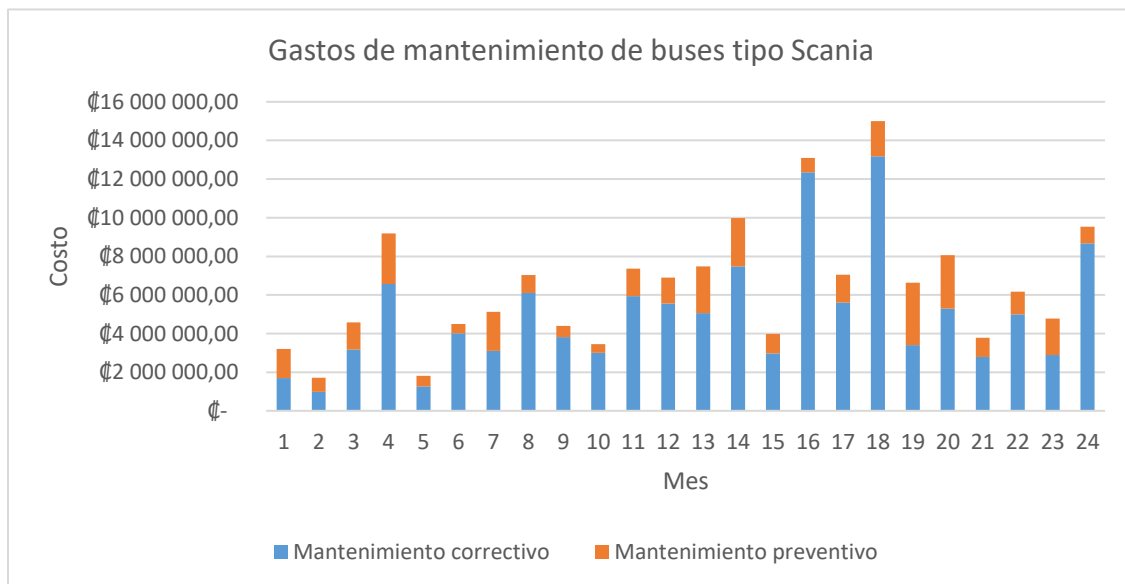
Gastos de mantenimiento de los buses tipo MB por mes en los años 2021 y 2022.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Figura 16.

Gastos de mantenimiento de los buses tipo Scania por mes en los años 2021 y 2022.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Los picos en los meses 16 y 18 (abril y junio de 2022) de las figuras 15 y 16 son debidos a la compra de llantas para los buses de la flota por un aproximado de ¢ 28 000 000 distribuidos entre ambos meses.

La cantidad de dinero destinada a mantenimiento en 2021 fue menor que en 2022, no obstante, la cantidad de carreras y por lo tanto la cantidad de kilómetros recorridos por bus también difieren. En 2021 la cantidad de kilómetros recorridos por bus es menor a los recorridos en 2022. La diferencia de dinero destinada a mantenimiento por año se puede ver en la tabla 7, donde se hace énfasis en la sección de la flota de los buses tipo MB.

Tabla 7. Gasto por tipo de mantenimiento en los años 2021 y 2022 de los buses tipo MB

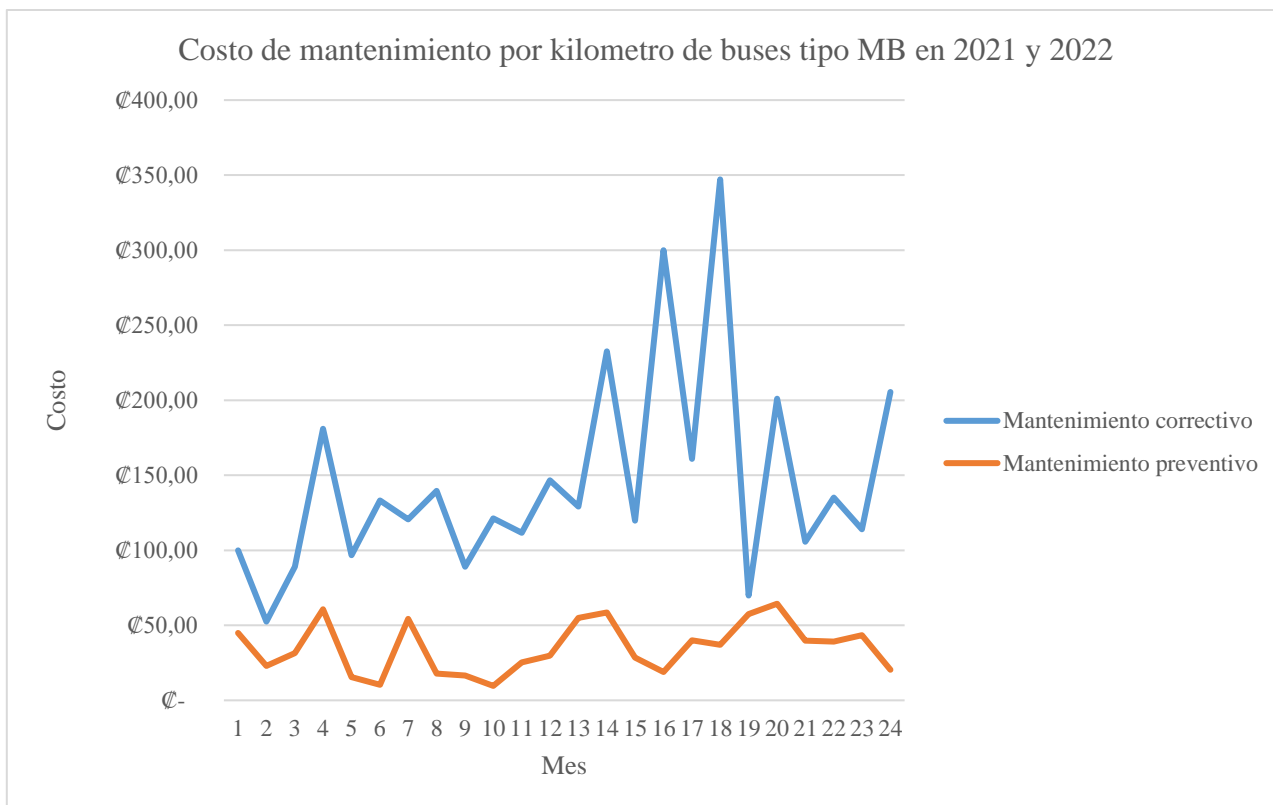
Año	2021	2022
Gasto en mantenimiento preventivo	¢ 10 230 993,08	¢ 19 362 602,77
Gasto en mantenimiento correctivo	¢ 43 215 172,59	¢ 81 681 373,33

Nota: Elaboración propia.

Esta diferencia en gasto y kilómetros recorridos por año llevó a la figura 17, donde se gráfica el costo de mantenimiento por kilómetro por tipo de mantenimiento:

Figura 17.

Gastos de mantenimiento por kilómetro por tipo de mantenimiento de los buses tipo MB por mes en los años 2021 y 2022



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Tabla 8. Gasto de mantenimiento por kilómetro por tipo de mantenimiento en los años 2021 y 2022 de los buses tipo MB.

Año	Gasto en mantenimiento correctivo por kilómetro	Gasto en mantenimiento preventivo por kilómetro
2021	₡ 141,39	₡ 29,26
2022	₡ 201,83	₡ 51,79

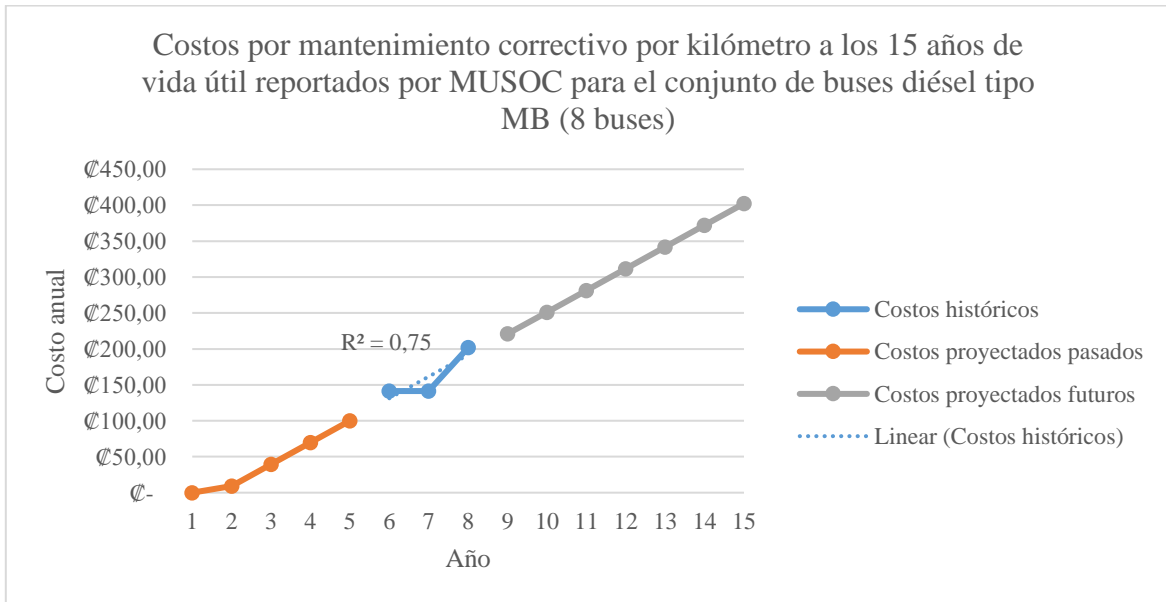
Nota: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 8, a pesar de tener una mayor cantidad de kilómetros recorridos, en el año 2022 se destinó más dinero en mantenimiento por kilómetro respecto a 2021, en concreto un 48,62% más sumando los dos tipos de mantenimiento recibidos por los buses.

Utilizando el supuesto de que los datos de costo por kilómetro de mantenimiento predictivo y correctivo de 2020 son iguales al promedio de 2021, debido a ser dos años sumidos en las restricciones sanitarias para el aforo en el transporte público, se realizó una proyección de los costos por kilómetro por mantenimiento desde 2015 a 2019 y de 2023 a 2028 para completar los 15 años de datos para la vida útil del bus. Los 15 años de vida útil a partir de la fabricación del bus son el máximo de años establecidos de funcionamiento según la *ley 7600, artículo 46 bis. -Autobuses de ruta* (Sistema Costarricense de Información Jurídica, s.f.). Las proyecciones a años pasados y futuros se dan en base a regresión y pronóstico lineales, según los datos del año 6 al 8 (2020, 2021 y 2022). Los datos de los tres años mencionados tienen una correlación lineal con un coeficiente de R^2 de 0,75 tanto para los datos de costo de mantenimiento por kilómetro de mantenimiento predictivo como de correctivo.

Figura 18.

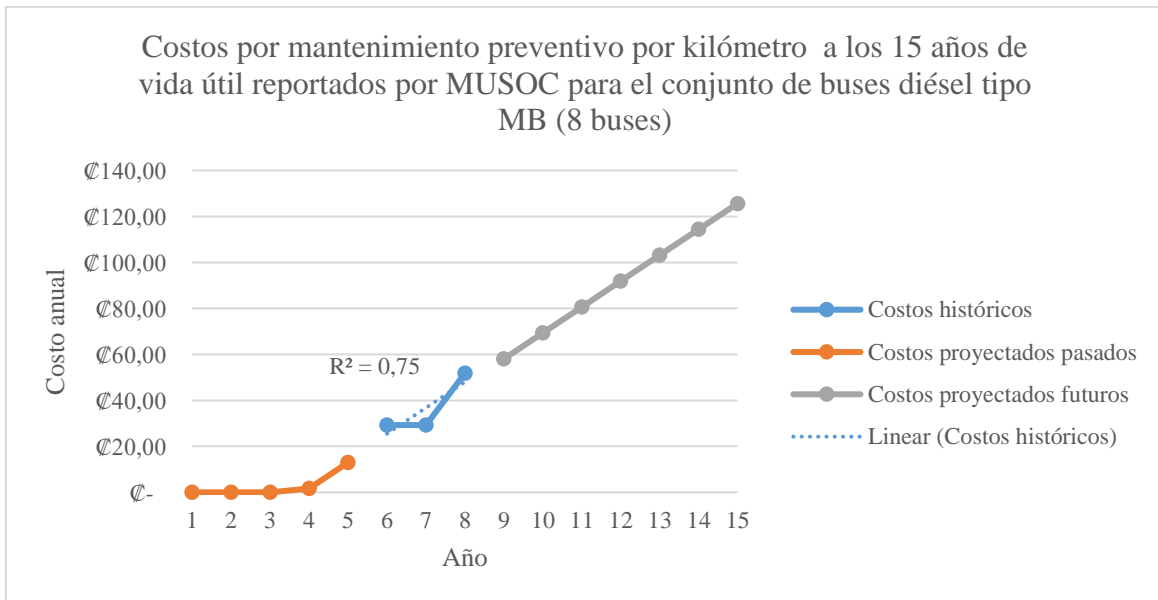
Gastos de mantenimiento correctivo por kilómetro de los buses tipo MB a los 15 años de vida útil.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Figura 19.

Gastos de mantenimiento preventivo por kilómetro de los buses tipo MB a los 15 años de vida útil.

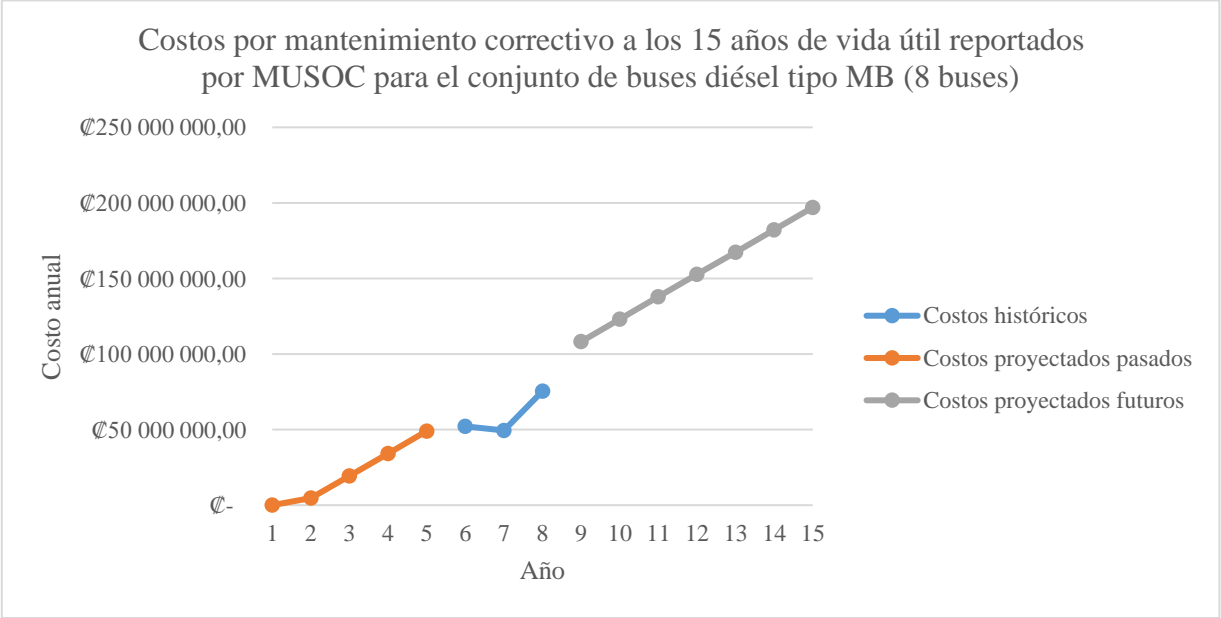


Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Con base a las figuras 18 y 19, se encontró el costo por tipo de mantenimiento de los buses tipo MB en sus 15 años de vida útil estimada. Esto se logró utilizando la cantidad de kilómetros estimados recorridos por bus por año, de los cuales se tienen los datos exactos para los años 2021 y 2022, el año 2020 se supuso igual a 2021, por ser dos años atípicos marcados por las restricciones sanitarias del periodo de la pandemia del covid-19, y los demás años se estimaron en base al recorrido anual con el itinerario de carreras actual.

Figura 20.

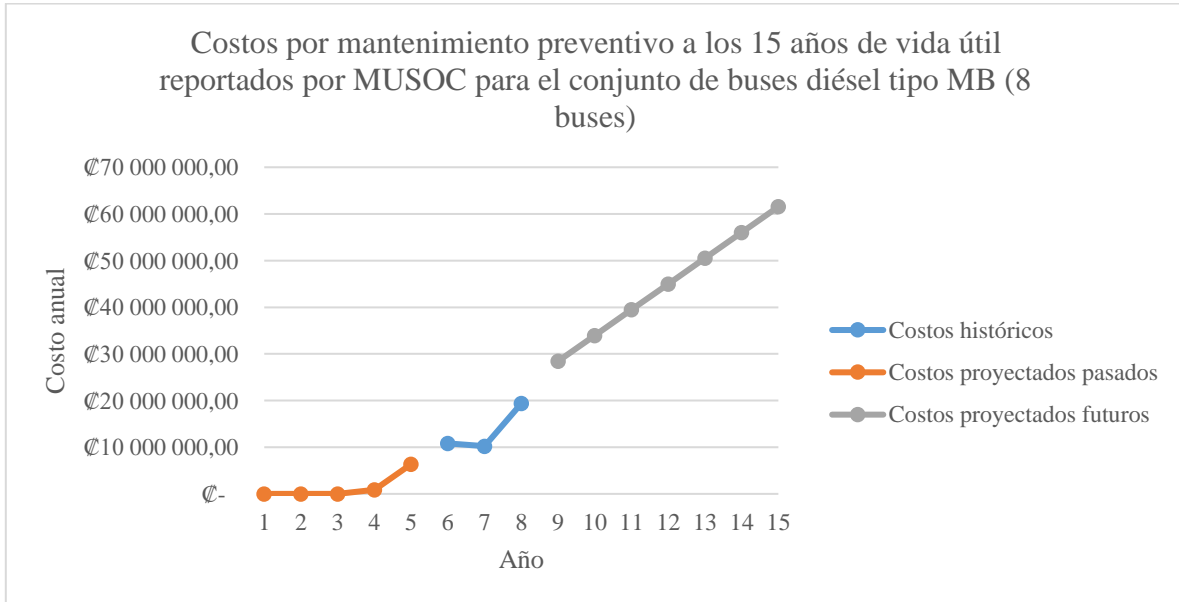
Gastos de mantenimiento correctivo anual de los buses tipo MB durante los 15 años de vida útil.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Figura 21.

Gastos de mantenimiento preventivo anual de los buses tipo MB durante los 15 años de vida útil.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Gracias a la regresión y proyección lineal de datos, se pudo obtener los costos de mantenimientos totales a 15 años de vida útil estimada, los cuales se pueden ver en las figuras 20 y 21, y se tabulan en la tabla 9.

Tabla 9. Gasto de mantenimiento de la flota de buses tipo MB en los 15 años de vida útil.

Costo total por mantenimiento correctivo estimado en los 15 años de vida útil de la flota de buses tipo MB	Costo total por mantenimiento preventivo estimado en los 15 años de vida útil de la flota de buses tipo MB	Costo total por mantenimiento estimado en los 15 años de vida útil de la flota de buses tipo MB
₱ 1 352 879 809,55	₱ 362 504 759,98	₱ 1 715 384 569,52

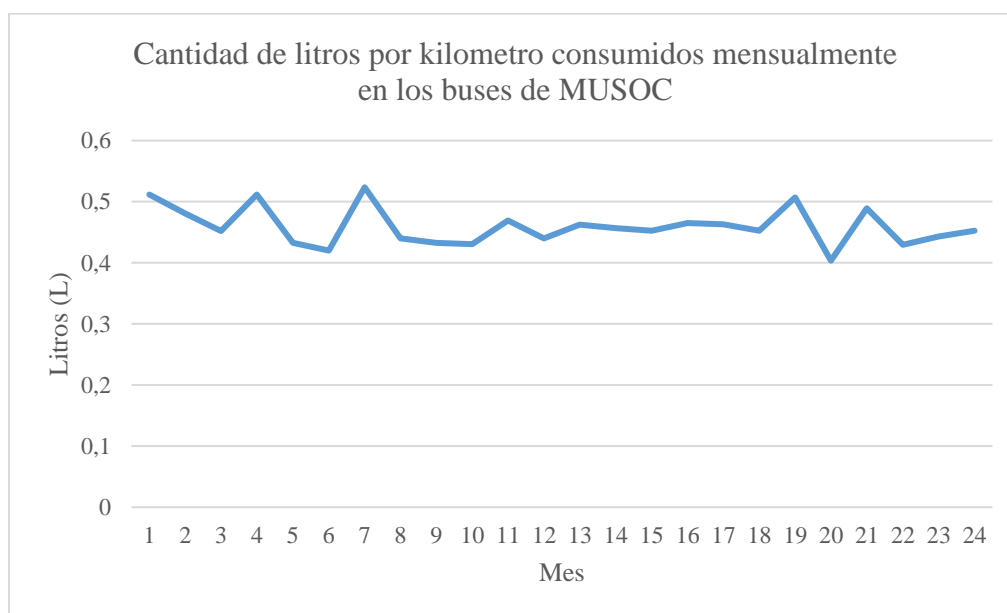
Nota: Elaboración propia.

Costo de operación

En tanto a los costos relacionados con la energía de los buses, el combustible diésel 50, también se cuenta con dos años de datos de consumos de combustibles y los costos relacionados. En este apartado, las facturas no diferencian tipo de bus, por lo que se realizó un análisis general de dichas facturas acerca del combustible y se dividieron proporcionalmente por tipo de bus en base a la cantidad de buses que hay por modelo. En la figura 22 se puede observar la cantidad de litros de diésel consumidos por kilómetro para los buses actuales de MUSOC, donde se puede observar que los valores están en un rango de 0,40 L a 0,52 L, con un promedio de 0,46 L y una desviación estándar de 0,03L.

Figura 22.

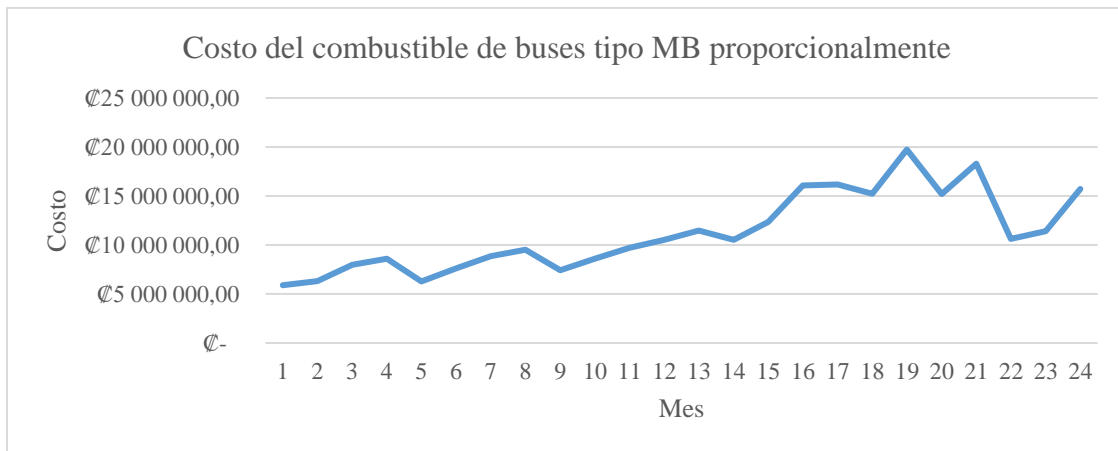
Rendimiento de diésel en litros por kilómetro de los buses de MUSOC mensualmente en los años 2021 y 2022.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Figura 23.

Costo del diésel por mes utilizado por los modelos tipo MB en 2021 y 2022.

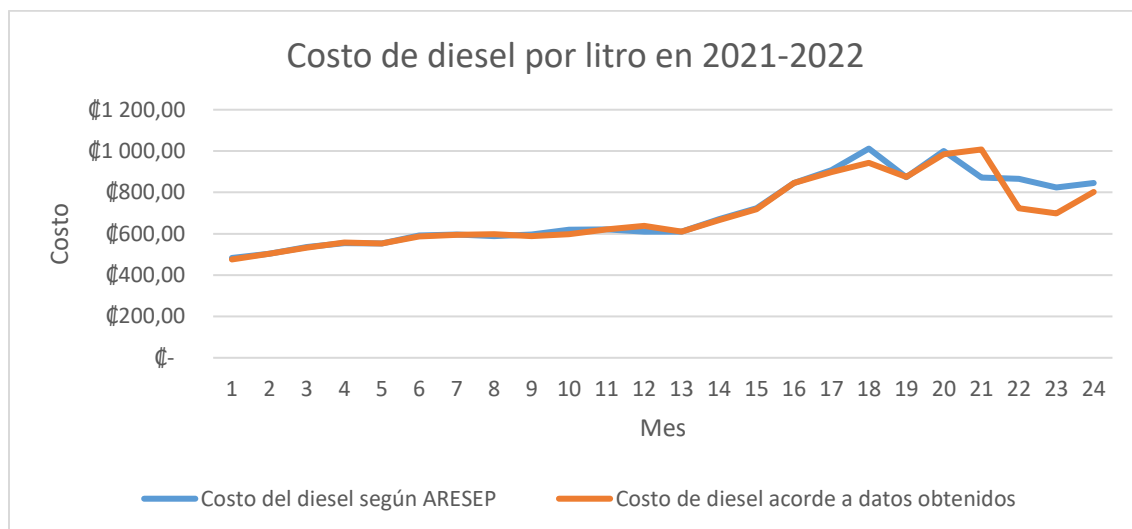


Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Con los costos del combustible mensuales de la figura 23 y litros por mes de diésel de la figura 22, se puede obtener una gráfica del costo por litro de diésel en base a los datos suministrados, para posteriormente compararse con los datos suministrados por la ARESEP para el mismo periodo de tiempo. Dicha gráfica se observa en la figura 24.

Figura 24.

Costo del litro de diésel en 2021 y 2022 en base a datos obtenidos y a datos de la ARESEP.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel con datos de (Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), 2023).

De la figura anterior se puede observar cómo ambas curvas tienen comportamientos muy similares hasta el mes 18 (junio de 2022), donde antes de dicho mes la diferencia mayor entre ambas curvas es del 4,4% y después de dicho mes es de 16,4%. Estableciendo una correlación lineal de Pearson entre ambas curvas se obtiene que un 92% de la variabilidad de los datos obtenidos mediante facturas se pueden explicar mediante los datos del ARESEP.

Los costos relacionados a consumo de diésel de los buses tipo MB en el año 2021 y 2022 están documentados tanto como su consumo en litros. Para estimar el costo total aproximado por diésel a los 15 años se hicieron los siguientes supuestos:

Ya que el rendimiento de litros por kilómetros en 2021 y 2022 tiene una baja desviación estándar respecto al promedio, se supone el promedio (0,46 L) como constante en todos los años que no son 2021 y 2020. Se toma el valor del costo del diésel por litro para 2023 y años posteriores como el valor dado por el ARESEP que rige a partir del 01/04/2023 el cual es de ₡ 634 por litro.

Para obtener los datos del costo del combustible para los periodos de 2015 a 2020 y 2023 a 2029 se obtuvieron la cantidad de litros totales consumidos trimestralmente en base a los kilómetros recorridos del horario actual. Posteriormente, para los años de 2015 a 2020 se tomó el último valor dado por el ARESEP de precio final de venta del litro de diésel de cada trimestre y en base a ese dato se encontró los costos relacionados a combustible. El costo del combustible estimado para el año 2023 tiene el dato dado por el ARESEP en el cierre del primer trimestre del año y los demás trimestres utilizan el dato de ₡ 634 por litro. Los años 2024 a 2029 también usan este último valor por litro de diésel por lo que ya obtenidos los litros a utilizar en dichos años se puede obtener su costo estimado.

Una vez obtenido los costos de operación de todos los 15 años de vida útil de la flota de buses tipo MB se obtuvo un total de **₡1 904 446 021,30**.

En tanto a los costos fijos de operación, se siguió la *Metodología para la Fijación Ordinaria de Tarifas para el Servicio Remunerado de Personas Modalidad Autobús* del ARESEP para su debido cálculo. En la tabla 10 se muestran el costo fijo de operación para una flota de 8 buses, tanto mensual, anual, como para los 15 años de vida útil.

Tabla 10. Costos fijos de operación para una flota de 8 buses.

Rubro	Costo
Costo personal de operación mensual	₡ 2 579 818,42
Costo del personal de mantenimiento mensual	₡ 13 331 437,92
Costo administrativo mensual	₡ 9 598 619,83
Costo sistema automatizado de pago electrónico y seguridad mensual	₡ -
Costo de los estudios de calidad del servicio mensual	₡ -
Costo de infraestructura de apoyo al servicio mensual	₡ 1 481 753,17
Otros gastos mensuales	₡ 7 702 415,58
Costo por limpieza y lavado de unidades mensual	₡ -
Costo total mensual	₡ 34 694 044,92
Costo total anual	₡ 416 328 539,00
Costo fijo total de operación a los 15 años	₡ 6 244 928 085,00

Nota: Elaboración propia.

Costo de descarte

La ley 7600, artículo 46 bis. -Autobuses de ruta, indica que el Consejo de Transporte Público y el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) no permitirán la circulación de autobuses de ruta en el servicio de transporte público, después de transcurridos quince años de su fabricación, siendo este plazo improrrogable (Sistema Costarricense de

Información Jurídica, s.f.). No obstante, en el anexo 1 de la *Ley de la Administración Financiera de la República y Presupuestos Públicos N° 8131* los autobuses se deprecian un 15% anualmente hasta los 7 años por método de la línea recta, lo que indica que al año 15 de vida útil el bus no contará con valor de rescate (Sistema Costarricense de Información Jurídica, s.f.).

Al finalizar los 15 años de operación en la ruta de MUSOC, los buses tienen distintas posibilidades para su descarte. Entre estas se encuentran el reciclaje de sus elementos capaces de ser reutilizados o reprocesados, el desecho de sus partes no reciclables o, por otra parte, destinar la utilidad restante de los buses por un periodo de 5 años más dirigiendo su funcionalidad al servicio de una ruta contratada por el Ministerio de Educación Pública para el transporte de estudiantes o docentes. Esto último se especifica en la resolución **RJD-069-2014**, siendo esta el *Modelo para el establecimiento de precios de referencia para el servicio transporte de estudiantes en rutas que contrata el Ministerio de Educación Pública bajo la modalidad de servicios adjudicados*, donde se menciona que la edad máxima que puede tener los vehículos automotores que conforman la flota óptima es de 20 años para los vehículos tipo microbús, buseta, autobús convencional urbano y autobús convencional interurbano (AUTORIDAD REGULADORA DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS, 2014). Otra posibilidad manejada por el sector administrativo de MUSOC es la venta de los buses a algún país del mercado centroamericano donde las regulaciones internas admitan el uso de buses para transporte público con más de 15 años de antigüedad.

En el caso de optar por reciclar todo lo posible de la flota de buses, de estos podrían aprovecharse materiales como: un 60% del polipropileno, 50% del caucho, un 20% del cobre,

entre otros materiales. Entre los componentes no reutilizables están el plástico reforzado con fibra de vidrio y los fluidos de los vehículos (Gabriel, y otros, 2021).

Costo del ciclo de vida

En la tabla 11 se muestra el cálculo del TCO de la flota de buses actuales tipo MB.

Tabla 11. Cálculo del TCO de la flota de 8 buses tipo MB.

Rubro	Colón	Dólar
Costo de adquisición	₡ 858 624 000,00	\$ 1 600 000,00
Costos fijos	₡ 6 244 928 085,00	\$ 11 637 090,20
Costo de mantenimiento	₡ 1 715 384 569,52	\$ 3 196 527,60
Costo de operación	₡ 1 904 446 021,30	\$ 3 548 833,52
Costo de descarte	₡ -	\$ -
TCO	₡ 10 723 382 675,82	\$ 19 982 451,32

Nota: Elaboración propia.

Conociendo el recorrido anual de un bus en el horario actual de MUSOC, se puede extrapolar dicho recorrido para conseguir la cantidad de kilómetros totales en 15 años de vida útil para la flota de 8 buses tipo MB, siendo un total de 7 347 629,59 km. Conociendo esta información se pudo obtener el indicador de TCO por kilómetro, tabulado en la tabla 12.

Tabla 12. TCO de los buses tipo MB por km.

Bus actual	Colón	Dólar
TCO por kilómetro (₡/km)		
(\$/km)	₡ 1 459,43	\$ 2,72

Nota: Elaboración propia.

Con el dato de la tabla 12, se puede obtener el costo de una carrera de 135 km, el cual sería de ¢ 197 023,63 o \$ 367,14.

Buses eléctricos (Yutong ZK6127BEV)

La selección de este modelo para su análisis de costo de ciclo de vida útil fue hecha y justificada en objetivo 1.

Costo de adquisición

En el **anexo 2** se muestra la cotización brindada por el representante de Yutong para la compra de 8 buses modelo ZK6127BEV y también para la compra de 4 cargadores de dos pistolas. Ya que la cotización se da en precio total CIF, el cálculo del monto total con impuestos se da en el **apéndice 3**. Dicho monto total para la flota de buses es de **¢1 719 188 490,24** o **\$ 3 203 616,00**.

Para abastecer los buses de energía eléctrica se debe de instalar cargadores tanto en el plantel de Gafeso en San Isidro de El General como en la terminal de San José. El diseño de la instalación eléctrica necesaria para alimentar dichos cargadores, con énfasis en los que se colocarían en el plantel de Gafeso fue cubierto en el objetivo 2.

En el **apéndice 4** se detallan los costos de la infraestructura eléctrica planteada en el objetivo 2. Sus costos están tabulados en la tabla 13.

Tabla 13. Costos de la infraestructura eléctrica necesaria para instalar los cargadores de buses eléctricos.

Rubro	Colones	Dolares
Instalación de mediana tensión	₡ 33 871 400,00	\$ 63 117,55
Materiales de baja tensión	₡ 21 589 656,83	\$ 40 231,17
Honorarios del ingeniero	₡ 5 397 414,21	\$ 10 057,79
4 cargadores Yutong SZ-160	₡ 66 436 032,00	\$ 123 800,00
Costo de infraestructura eléctrica en un plantel	₡ 127 294 503,03	\$ 237 206,51
Costo de infraestructura eléctrica en dos planteles	₡ 254 589 006,07	\$ 474 413,03

Nota: Elaboración propia.

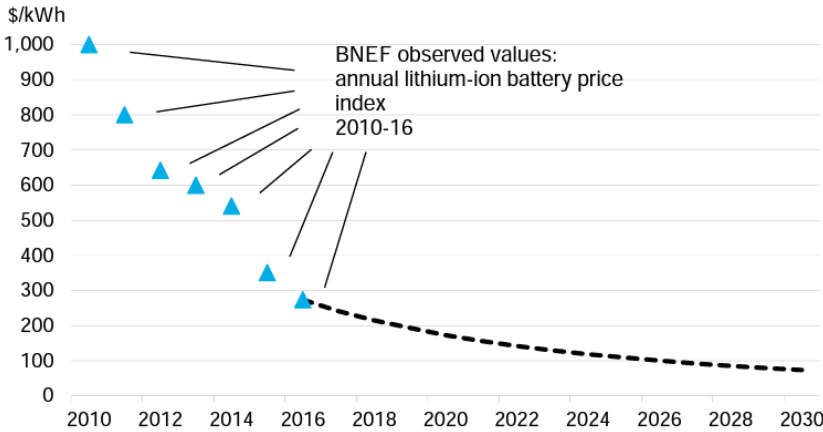
La batería del bus es una batería de ion de litio, con celdas de tipo fosfato de litio-hierro, también conocidas como baterías LFP, con una capacidad de almacenamiento de energía de 350,07 kWh. Dichas baterías tienen un mínimo de ciclos de carga descarga de 3000 ciclos para que sean atractivas para los fabricantes (Cueva, Lucero, Guzmán, Rocha, & Espinoza, 2018). Las baterías de los buses una vez operen en la empresa se cargarían cada vez que el bus realice una carrera de ida y una carrera de vuelta a la terminal. Dicho tramo entre carga y carga consta de 270 km, y ya que el número de carreras anual estimado que se dio en base al número de carreras del horario actual, es de 61230,25 km promedio por bus, significa que cada año se realizan aproximadamente 227 ciclos de recarga. Con esta respectiva cantidad de ciclos de carga descarga por año en 13 años y 3 meses se completarían los 3000 ciclos. No obstante, los fabricantes de vehículos eléctricos que implementan baterías LFP tienen de meta que las baterías lleguen a 10 años de vida útil, por lo que su

funcionamiento y capacidad después de dicha longevidad no es asegurada. Teniendo en cuenta lo anterior, se planeó un cambio de baterías para los buses a los 10 años de su vida útil, lo que significaría un cambio de baterías en el año 2033

En base al análisis de costos, se encontró que las baterías eléctricas tienen una alta dependencia al costo total de los materiales de sus componentes, lo cual esta influenciado por mercados altamente volátiles, lo que significa que, aunque la tendencia del precio de las baterías eléctricas tienda a la baja no lo hará indefinidamente (Duffner, Wentker, Greenwood, & Leker, 2020). Según la figura 25 se estima que el precio actual de las baterías de ion de litio ronda los \$130,77/kWh, mientras que en 2030 rondará por \$74/kWh (Curry, 2017).

Figura 25.

Proyección de costos de baterías LFP hasta el año 2030.



Nota: gráfico obtenido de (Curry, 2017).

En la tabla 14 se estimaron los costos actuales de las baterías de la nueva flota de buses eléctricos y el costo del paquete de cambio de baterías a los 10 años de vida útil de los buses.

Tabla 14. Costo de las baterías actuales del bus Yutong ZK6127BEV y costo de adquisición de paquete de baterías a los 10 años.

Precio actual de la batería LFP (\$/kWh)	130,77
Precio futuro de la batería LFP (\$/kWh)	74
Capacidad de la batería (kWh)	350,07
Precio de la batería de fábrica para 8 buses	₡ 196 533 254,63
Precio del paquete futuro de baterías para 8 buses	₡ 111 214 046,36

Nota: Elaboración propia.

Al copilar los costos del sistema eléctrico a contruir, el costo de adquisición de los buses eléctricos y el costo por el precio del paquete nuevo de baterías LFP a los 10 años, se obtiene unos costos de adquisición totales de **₡2 084 991 542,67** o **\$3 885 270,47**.

Costo de mantenimiento

El dato de referencia de costo de mantenimiento por unidad de desplazamiento fue obtenido por literatura, y es de \$ 0,64/milla o ₡ 213,41/km (Aamodt, Cory, & Coney, 2021). En la tabla 15 se puede observar el costo de mantenimiento proyectado a los 15 años de vida útil del bus eléctrico

Tabla 15. Gasto de mantenimiento de los 8 buses eléctricos en los 15 años de vida útil.

Costo de mantenimiento	Colón	Dólar
Por kilómetro (divisa/km)	₡ 213,41	\$ 0,40
Por año	₡ 104 537 282,09	\$ 194 799,65
A los 15 años	₡ 1 568 059 231,30	\$ 2 921 994,69

Nota: Elaboración propia.

Costo de operación

Los costos relacionados al consumo de energía mensualmente fueron abarcados en el **apéndice 5** y tabulados en la tabla 16. El dato de kWh/km fue obtenido del **anexo 4**.

Tabla 16. Costos de energía eléctrica asociados a la operación de la flota de 8 buses eléctricos.

Costo del consumo de energía eléctrica	Colón	Dólar
Por mes	₡ 1 958 919,91	₡ 3 650,34
Por año	₡ 23 507 038,86	₡ 43 804,11
A los 15 años	₡ 352 605 582,95	₡ 657 061,69

Nota: Elaboración propia.

Los valores de la tabla 16 fueron obtenidos en base a la tarifa promocional T-BE para buses eléctricos, anunciada en la resolución *RE-0021-IE-2023 FIJACIÓN DE OFICIO DE LA TARIFA PROMOCIONAL PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA ASOCIADO Y DEDICADO A LOS CENTROS DE RECARGA EN PLANTEL PARA AUTOBUSES ELÉCTRICOS*. Dicha tarifa es de ₡53,41/kWh, la cual es menor a la tarifa de comercios, servicios e industria de ₡72,89/kWh a partir de los 3000 kWh. La tarifa T-BE es un 26,73% menor que la otra tarifa antes mencionada, sin contar dicha tarifa también debe de pagar cargos de potencia pico.

Los costos fijos de operación para la flota de 8 buses eléctricos fueron calculados en la tabla 10, los cuales son de **₡ 6 244 928 085,00**.

Costo de descarte

La etapa de descarte de los buses eléctricos es muy similar a lo mencionado en la sección de costo de descarte del bus tipo MB, con la diferencia del descarte de las baterías

LFP. Como se comentó en la sección de costo de adquisición, se estima un cambio del paquete de baterías a los 10 años de operación, por lo que las baterías que se sustituirían han de ser descartadas. Dichas baterías LFP pueden tener aplicaciones para su segunda vida útil en apoyo a la red eléctrica, apoyo en actividades agropecuarias, soporte de la red eléctrica en zonas remotas o apoyo en actividades mineras. El valor residual de dichas baterías se estima en un 20% de su valor de compra (Romero & Ramírez, 2020). Se tomará este mismo valor residual en las baterías que tendría el bus a sus 15 años de vida útil. En la tabla 17 se muestra el valor residual de ambos paquetes de baterías.

Tabla 17. Valores residuales de los paquetes de baterías LFP.

Costo	Colón	Dólar
Paquete de 8 baterías iniciales	₡ 196 533 254,63	\$ 366 229,23
Paquete de 8 baterías futuras	₡ 111 214 046,36	\$ 207 241,44
Valor de rescate de las 8 baterías originales	₡ 39 306 650,93	\$ 73 245,85
Valor de rescate de las 8 baterías futuras	₡ 22 242 809,27	\$ 41 448,29

Nota: Elaboración propia.

Costo del ciclo de vida

En la tabla 18 se muestra el cálculo del TCO de la flota de buses eléctricos. El costo de descarte entra como negativo debido a que es un ingreso y no un costo.

Tabla 18. Cálculo del TCO de la flota de 8 buses eléctricos.

Rubro	Colón	Dólar
Costo de adquisición	₡ 2 084 991 542,67	\$ 3 885 270,47
Costos fijos	₡ 6 244 928 085,00	\$ 11 637 090,20
Costo de mantenimiento	₡ 1 568 059 231,30	\$ 2 921 994,69
Costo de operación	₡ 352 605 582,95	\$ 657 061,69
Costo de descarte	₡ -61 549 460,20	\$ -114 694,13
TCO	₡ 10 189 034 981,72	\$ 18 986 722,91

Nota: Elaboración propia.

Similar a la tabla 12, la tabla 19 muestra el indicador de TCO por kilómetro para la flota de 8 buses eléctricos.

Tabla 19. TCO de los buses eléctricos por km.

Bus eléctrico	Colón	Dólar
TCO por kilómetro (₡/km) (\$/km)	₡ 1 386,71	\$ 2,58

Nota: Elaboración propia.

Con el dato de la tabla 19, se puede obtener el costo de una carrera de 135 km, el cual sería de ₡ 187 205,92 o \$ 348,85.

Buses diésel nuevo

El análisis del modelo de bus diésel nuevo se realizó en base a una cotización realizada a la empresa Eurobus S.A., en la cual recomendaron un bus de motor y chasis marca

Scania. Las características brindadas de dicho bus son las siguientes: motor de 6 cilindros de 360 HP de potencia, tanque de diésel de 500 L y 50 asientos para pasajeros.

Costo de adquisición

El costo brindado para la adquisición de dicho bus es de \$ 240 000 por bus, lo que se extiende para una flota de 8 buses en **\$ 1 920 000**.

Costo de mantenimiento

El dato de referencia de costo de mantenimiento por unidad de desplazamiento fue obtenido por literatura, y es de \$ 0,88/milla o ₡ 293,44/km (Aamodt, Cory, & Coney, 2021). En la tabla 20 se puede observar el costo de mantenimiento proyectado a los 15 años de vida útil del bus eléctrico

Tabla 20. Gasto de mantenimiento de los 8 buses diésel nuevos en los 15 años de vida útil.

Costo de mantenimiento	Colón	Dólar
Por kilómetro (divisa/km)	₡ 293,44	\$ 0,55
Por año	₡ 143 738 762,87	\$ 267 849,51
A los 15 años	₡ 2 156 081 443,04	\$ 4 017 742,70

Nota: Elaboración propia.

Costo de operación

Los costos relacionados al consumo de energía (diésel) mensualmente fueron abarcados en el **apéndice 5** y tabulados en la tabla 21.

Tabla 21. Costos de consumo de diésel asociados a la operación de la flota de 8 buses diésel nuevos.

Costo del consumo de diésel	Colón	Dólar
Por mes	₡ 12 294 813,30	\$ 22 910,73
Por año	₡ 147 537 759,60	\$ 274 928,74
A los 15 años	₡ 2 213 066 394,00	\$ 4 123 931,12

Nota: Elaboración propia.

Los costos fijos de operación para la flota de 8 buses eléctricos fueron calculados en la tabla 10, los cuales son de **₡ 6 244 928 085,00**.

Costo de descarte

Lo referente a los costos de descarte es equivalente a todo lo mencionado en la sección de costo de descarte de los buses tipo MB.

Costo del ciclo de vida

En la tabla 22 se muestra el cálculo del TCO de la flota de 8 buses diésel nuevos.

Tabla 22. Cálculo del TCO de la flota de 8 buses diésel nuevos.

Rubro	Colón	Dólar
Costo de adquisición	₡ 1 030 348 800,00	\$ 1 920 000,00
Costos fijos	₡ 6 244 928 085,00	\$ 11 637 090,20
Costo de mantenimiento	₡ 2 156 081 443,04	₡ 4 017 742,70
Costo de operación	₡ 2 213 066 394,00	₡ 4 123 931,12
Costo de descarte	₡ -	\$ -
TCO	₡ 11 644 424 722,04	\$ 21 698 764,02

Nota: Elaboración propia.

Similar a la tabla 12, la tabla 23 muestra el indicador de TCO por kilómetro para la flota de 8 buses diésel nuevos.

Tabla 23. TCO de los buses diésel nuevos por km.

Bus diésel nuevo	Colón	Dólar
TCO por kilómetro (¢/km) (\$/km)	¢ 1 584,79	\$ 2,95

Nota: Elaboración propia.

Con el dato de la tabla 23, se puede obtener el costo de una carrera de 135 km, el cual sería de ¢ 213 946,19 o \$ 398,68.

Análisis financiero

Para el análisis financiero, se tomaron en cuenta todos los costos relacionados a la adquisición de la flota de buses eléctricos con la adquisición de la flota de buses diésel nuevos, a lo largo de los 15 años de vida útil. En la tabla 24 se observa la comparativa de los costos de mantenimiento y costos por energía anuales, donde la flota de buses eléctricos presenta un ahorro anual de 84,07% en energías, un 27,27% en mantenimiento y también un 12,50% de ahorro en TCO a lo largo de 15 años.

Tabla 24. Comparación de costos de las flotas de buses diésel nuevos y la de buses eléctricos.

Costo	Flota de buses diésel nuevos	Flota de buses eléctricos	Ahorro
Costo anual por energía	¢ 147 537 759,60	¢ 23 507 038,86	84,07%
Costo anual por mantenimiento	¢ 143 738 762,87	¢ 104 537 282,09	27,27%
TCO	¢ 11 644 424 722,04	¢ 10 189 034 981,72	12,50%

Nota: Elaboración propia.

En el **apéndice 6** se encuentra el análisis financiero mediante flujo de caja de ambos tipos de flota, donde se utilizó una tasa de interés del 8,52%, el cual es el rendimiento mínimo esperado del dinero invertido debido a que es la tasa nominal de interés para certificados de plazo del Banco de Costa Rica (Banco de Costa Rica, 2023). También se les aplicaron a los costos el efecto del aumento inflacionario, el cual está tasado de manera interanual promedio de 4,5% (Banco Central de Costa Rica, 2023). Mediante la realización de un flujo de caja para los gastos de ambas flotas, se encontró el VAN de dichas flotas para su periodo de vida útil.

Tabla 25. VAN de los costos del proyecto de adquisición de una flota de 8 buses diésel nuevos y 8 buses eléctricos nuevos

VAN flota diésel	₡6 083 961 794,34
VAN flota eléctrica	₡5 737 064 062,19

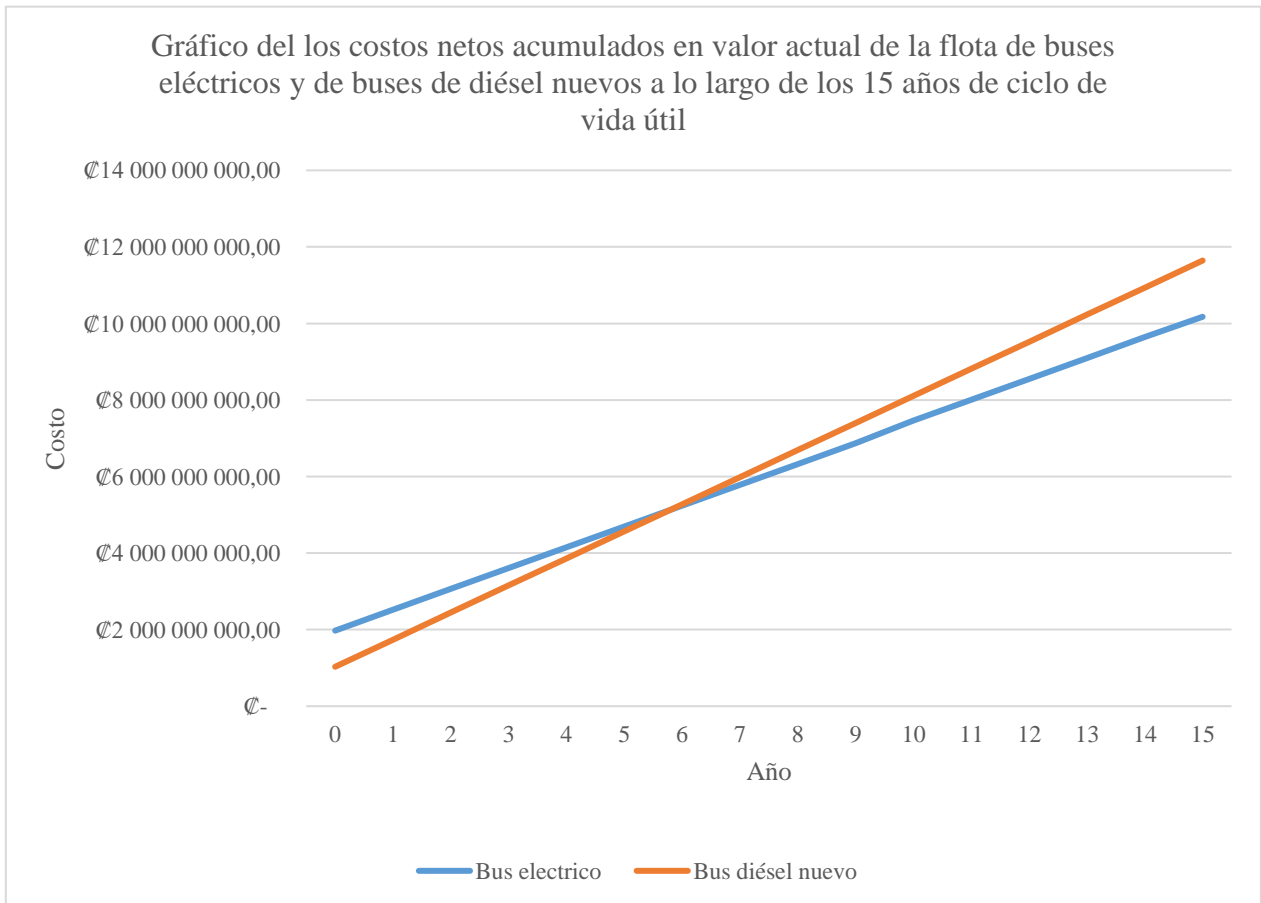
Nota: Elaboración propia.

En la tabla 25 se muestra el VAN de la adquisición de ambas flotas, siendo el proyecto de adquisición de la flota eléctrica más económico que el de la flota diésel. Respecto a la flota de combustión interna, el proyecto de la adquisición de la flota eléctrica es 5,70% menos costoso.

En la figura 26 se observa que el valor del costo neto actual acumulado de la flota de buses diésel nuevos supera al costo de la flota de buses eléctricos en algún punto del quinto año de vida útil.

Figura 26

Gráfico de costos netos acumulados en valor actual de la flota de buses eléctricos y de buses de diésel nuevos a lo largo de los 15 años de ciclo de vida útil.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Análisis comparativo

Con base a los datos obtenidos en el presente capítulo, se encontró que:

- Los buses eléctricos Yutong tienen un rendimiento energético de 0,87 kWh/km y los buses diésel 0,46 L/km. Se conoce que el diésel que se comercializa en Costa Rica posee un poder calórico de 37,64 MJ/L (RECOPE, 2021). Para la conversión de

ambos datos de consumo por kilómetro tanto de los buses eléctricos como de los buses diésel a MJ/km se procedió a las siguientes conversiones:

Para bus eléctrico:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} \rightarrow 0,87 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} * \frac{3,6 \text{ MJ}}{\text{kWh}} = 3,13 \frac{\text{MJ}}{\text{km}} \quad (5)$$

Para bus diésel:

$$0,46 \frac{\text{L}}{\text{km}} * 37,64 \frac{\text{MJ}}{\text{L}} = 17,31 \frac{\text{MJ}}{\text{km}} \quad (6)$$

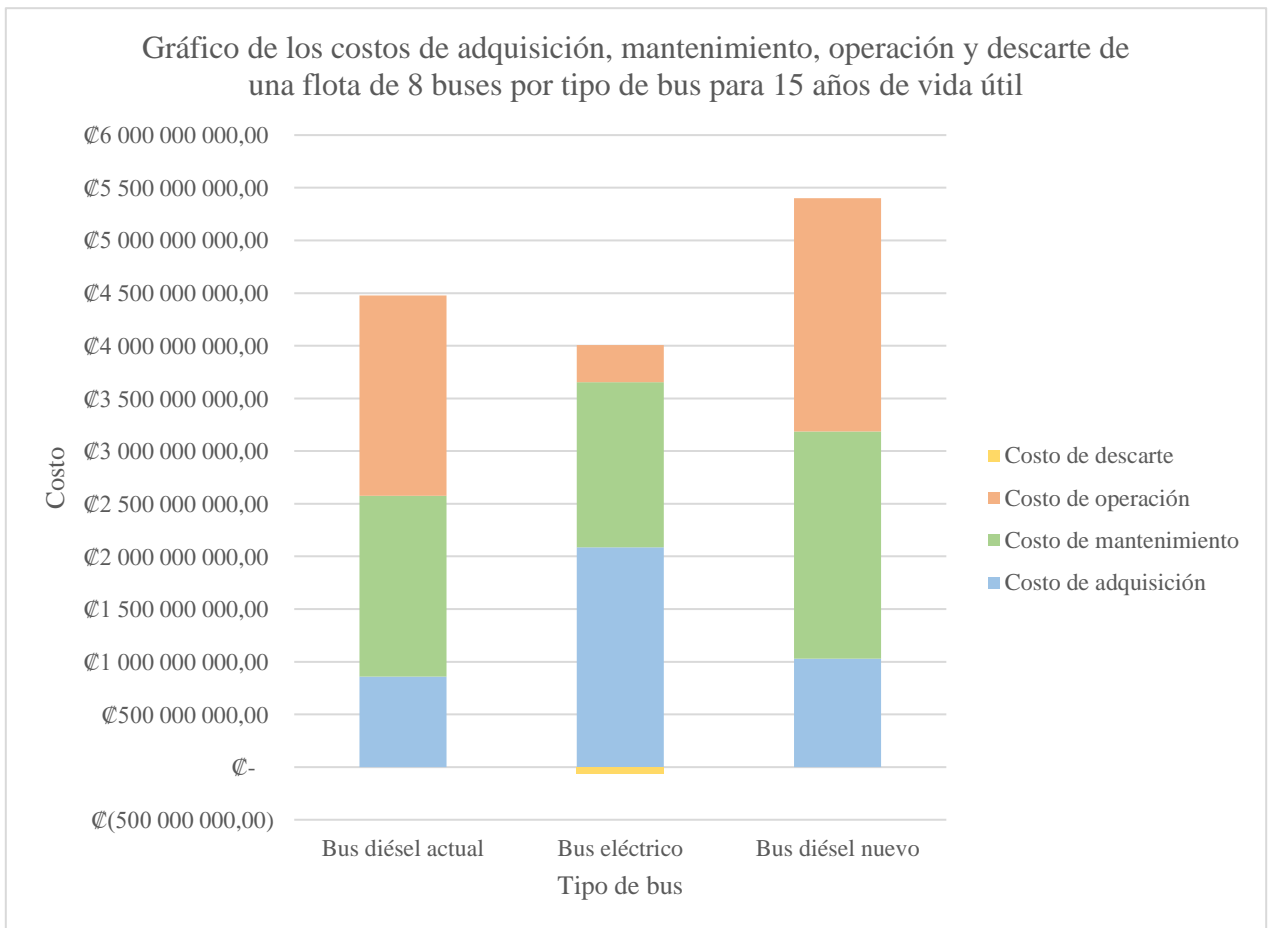
Una vez obtenidos los rendimientos por kilómetro en una misma unidad, se puede observar que el bus eléctrico es un 81,92% más eficiente energéticamente con relación al bus diésel.

- La flota de 8 buses eléctricos presenta el menor TCO, siendo ₡ 534 347 694,10 menor que el del bus actual y ₡ 1 455 389 740,32 menor que la flota de buses diésel nuevos.
- En la figura 27 se observa un gráfico con los costos relacionados a las flotas de cada tipo de bus, exceptuando el costo fijo de operación. En dicha figura se observa gráficamente como el costo de operación de la flota de buses eléctricos es el menor de todas las flotas analizadas, en concreto un 81,48% menor que el costo en la flota actual de buses diésel y un 84,07% menor que en la flota de buses diésel nuevos.
- También en la figura 27 se muestra como el costo de adquisición de la flota de buses eléctricos es mucho mayor que la de ambas flotas de buses diésel, siendo 2,43 veces mayor al costo de adquisición de los buses diésel actuales y 2,02 veces mayor que los buses diésel nuevos. Esta diferencia de costos tan abrupta es debido a que el implementar una flota de buses eléctricos conlleva gastos en infraestructura necesaria

para alimentar dichos buses, además de que el costo individual de cada bus es mayor a los costos individuales de los buses diésel analizados.

Figura 27

Gráfico de barras apiladas con los costos de adquisición, mantenimiento, operación y descarte de una flota de 8 buses por tipo de bus analizado.



Nota: Elaboración propia en Microsoft Excel.

- La flota de buses eléctricos también obtuvo el menor costo de mantenimiento en la figura 27, siendo un 8,59% menor que en la flota de buses diésel actual y un 27,27% menor que en la flota de buses diésel nuevos.

Objetivo 4.

Establecer el impacto ambiental y a la salud generado por una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en términos de emisiones de gases contaminantes en la empresa de transporte público.

El objetivo 4 del presente documento se limita a establecer el impacto ambiental y a la salud, desde el momento en donde la empresa toma posesión de la flota de buses al momento en donde se descartan de la lista de activos de la empresa, dicho de otro modo, en su etapa operativa.

Emisiones relacionadas a la flota de buses de combustión interna

Acorde con los objetivos propuestos con el Libro Blanco de Transporte de la Unión Europea, se ha adoptado políticas específicas para establecer objetivos que buscan lograr una reducción del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte para 2050 en comparación a los niveles medidos en 1990 (Nanaki, y otros, 2017). En la tabla 26, se listan los factores de emisión máximos establecidos por tipo de tecnología enfocada en reducción de emisiones. Los factores tabulados en dicha tabla indican los factores de emisión de los siguientes gases: dióxido de carbono (CO_2), óxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), materia particulada $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} (PM) y óxidos nitrosos (NO_x).

Tabla 26. Factores de emisión de gramos de partículas contaminantes por kilómetro para buses diésel según su tecnología EURO.

ENGINE TYPE	CO₂ gr/km	CO gr/km	HC gr/km	PM gr/km	NO_x gr/km
EURO I	1.397	1,50	0,3	0,45	16
EURO II	1.386	1,35	0,2	0,2	14
EURO III	1.351	1,00	0,15	0,18	9
EURO IV	1.343	0,95	0,09	0,06	6,38
EURO V	1.330	0,74	0,06	0,01	3,83

Nota: Tabla obtenida de (Nanaki, y otros, 2017).

Los 8 buses tipo MB de MUSOC poseen la tecnología EURO 3, por lo tanto, en la tabla 27 se observa su cantidad de emisiones tanto por bus como por flota de buses tipo MB, para un año y para los 15 años de vida útil.

Tabla 27. Emisiones de contaminantes producidos por la flota de 8 buses tipo MB de MUSOC.

Emisiones	CO ₂ (kg)	CO (kg)	HC (kg)	PM (kg)	NO _x (kg)
Por bus anualmente	82 722,06	61,23	9,18	11,02	551,07
Por bus a los 15 años	1 240 830,95	918,45	137,77	165,32	8 266,08
Por flota anualmente	661 776,50	489,84	73,48	88,17	4 408,58
Por flota a los 15 años	9 926 647,57	7 347,63	1 102,14	1 322,57	66 128,67

Nota: Elaboración propia.

Aparte de las emisiones relacionadas al proceso de la combustión del diésel, también existen las emisiones de CO₂ producidas por la aplicación de aceites lubricantes. Para determinar dichas emisiones se encontró la cantidad total de litros de lubricante aplicados a la flota de 8 buses tipo MB a lo largo de 15 años, mediante el esquema de aplicación de aceites lubricantes actual de la empresa de la tabla 28.

Tabla 28. Esquema de aplicación de aceites lubricantes a los distintos sistemas del bus.

Sistema	Tipo de lubricante	Cantidad de lubricante al cambio (L)	Cantidad de kilómetros entre cambios (km)
Motor	15W40	32,00	20000
transmisión	75W90	13,25	60000
Diferencial	80W90	10,00	200000
Retardador	15W40	7,00	45000

Nota: Elaboración propia.

Mediante el esquema de aplicación de aceites lubricantes se encontró la cantidad de aceite total aplicado a la flota de buses tipo MB en la tabla 29.

Tabla 29. Cantidad de litros de lubricante aplicados a los buses tipo MB de la flota de MUSOC.

Sistema	Litros anuales de lubricante consumidos por bus (L)	Litros de lubricante consumidos por bus a los 15 años (L)	Litros de lubricante consumidos por la flota de 8 buses tipo MB a los 15 años (L)
Motor	97,97	1469,53	11756,21
transmisión	13,52	202,81	1622,47
Diferencial	3,06	45,92	367,38
Retardador	9,52	142,87	1142,96
Total	124,08	1861,13	14889,02

Nota: Elaboración propia.

Conociendo la cantidad de kilómetros recorridos y la cantidad de litros de aceites lubricantes utilizados tanto anualmente como a los 15 años de vida útil por bus, se calcularon las emisiones de CO₂ producidas por aceites lubricantes para la flota de 8 buses tipo MB de MUSOC en la tabla 30, en base al factor de emisión de uso de lubricantes de 0,5184 kg CO₂/L de lubricante (Instituto Meteorológico Nacional, 2022).

Tabla 30. Emisiones de CO₂ relacionadas a la aplicación de lubricantes en la flota de 8 buses tipo MB de MUSOC.

Tipo de emisión	Por año por bus tipo MB	Por bus tipo MB a los 15 años	Flota de 8 buses tipo MB a los 15 años
Emisiones de CO ₂ equivalentes (kg)	64,32	964,81	7 718,47

Nota: Elaboración propia.

Emisiones relacionadas a la flota de los buses eléctricos

Los buses eléctricos, a pesar de que directamente no emiten gases contaminantes debido a un proceso de combustión, estos también utilizan aceites lubricantes. Debido a que no se tiene un plan de mantenimiento específico para el modelo de bus Yutong ZK6127BEV, se tomó como referencia un plan de mantenimiento enfocado a un bus eléctrico BYD K11A para calcular la cantidad de litros lubricante utilizados por el bus eléctrico. Los litros de aceites lubricantes utilizados están en la tabla 31.

Tabla 31. Cantidad de litros de lubricante aplicados a los buses tipo eléctricos y a una flota de 8 buses eléctricos a 15 años de vida.

Sistema	Litros anuales de lubricante consumidos por bus (L)	Litros de lubricante consumidos por bus a los 15 años (L)	Litros de lubricante consumidos por la flota de 8 buses eléctricos a los 15 años (L)
Electromotores	9,2	138	1104
Reductores	10	150	1200
Compresor	4,7	70,5	564
Sistema de dirección	16	240	1920
Total	39,9	598,5	4788

Nota: Elaboración propia, con datos de (SÁNCHEZ, ALVAREZ, & STALYN, 2018).

Utilizando el mismo factor aplicado a la tabla 30, se calcularon las emisiones de CO₂ producidas por aceites lubricantes para la flota de 8 buses eléctricos en la tabla 32.

Tabla 32. Emisiones de CO₂ relacionadas a la aplicación de lubricantes en la flota de 8 buses eléctricos

Tipo de emisión	Por año por bus eléctrico	Por bus eléctrico a los 15 años	Flota de 8 buses eléctrico a los 15 años
Emisiones de CO ₂ equivalentes (kg)	20,68	310,26	2 482,10

Nota: Elaboración propia.

Adicionalmente, los buses eléctricos al ser alimentados de la red eléctrica nacional, a menos que esta se produzca meramente de fuentes renovables, también tienen su componente de emisión de CO₂ equivalente. Dicho factor de emisión en el sector electricidad para el 2021 fue de 0,04 kg CO₂e/kWh (Instituto Meteorológico Nacional, 2022). En el **anexo 4** se

encuentra el dato de kWh/km, por lo que se obtuvo en la tabla 33 la cantidad total de kWh anualmente por bus y por flota eléctrica, además de obtener el dato para la flota eléctrica de 8 buses para 15 años de vida útil. No obstante, cabe recalcar que la energía eléctrica producida en Costa Rica viene de fuentes 100% renovables la mayor parte del año.

Tabla 33. Consumo de energía de la flota de 8 buses eléctricos.

kWh consumidos anualmente por bus eléctrico (kWh)	kWh consumidos anualmente para la flota de 8 buses eléctricos (kWh)	kWh consumidos durante 15 años para la flota de 8 buses eléctricos (kWh)
53 270,31	426 162,52	6 392 437,74

Nota: Elaboración propia.

Con los datos de la tabla 33, se puede calcular la emisión de CO₂ emitida por los buses eléctricos debido a su alimentación de la red eléctrica nacional, el cual esta tabulado en la tabla 34.

Tabla 34. Emisión de CO₂ emitida por la flota de 8 buses eléctricos.

Tipo de emisión	Por año por bus tipo eléctrico	Por bus eléctrico a los 15 años	Flota de 8 buses eléctricos a los 15 años
Emisiones de CO ₂ equivalentes (kg)	2 130,81	17 046,50	255 697,51

Nota: Elaboración propia.

Análisis comparativo

En la tabla 35 se muestra la comparativa de las emisiones relacionadas a la operación de ambos tipos de buses.

Tabla 35. Emisiones relacionadas a la operación de 8 buses de una flota de buses tipo MB con una de buses eléctricos, ambas para 15 años de operación.

Tipo de emisión	Emisiones de flota de 8 buses tipo MB	Emisiones de flota de 8 buses eléctricos	Ahorro de emisiones
CO ₂ equivalente (kg)	9 926 647,57	255 697,51	97,42%
CO (kg)	7347,63	0	100,00%
HC (kg)	1102,14	0	100,00%
PM (kg)	1322,57	0	100,00%
NO _x (kg)	66128,67	0	100,00%
CO ₂ equivalente de lubricantes (kg)	7718,47	2482,10	67,84%

Nota: Elaboración propia.

De la tabla 35, se obtiene un 97,42% de ahorro en emisiones de CO₂ al utilizar buses eléctricos en lugar de buses de combustión interna. Dicho 97,42% indica un ahorro directo de 9 670,95 toneladas de CO₂ a los 15 años de operación. Similar al CO₂ equivalente, el CO₂ equivalente de lubricantes presentó un ahorro de 67,84%, lo que representó un ahorro a los 15 años de 5,24 toneladas de CO₂. El bus eléctrico, al no presentar combustión en su proceso de funcionamiento, tiene un ahorro total en emisión de partículas de CO, HC, NO_x, PM_{2,5} y PM₁₀.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Objetivo específico 1. Sobre el estudio de mercado y el contexto operativo

Se analizaron los requerimientos de la empresa en términos de las características de los buses de combustión que poseen y su contexto operativo, para una posterior revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado con características similares. Se encontró que la empresa cuenta con dos tipos distintos de buses en su flota, de los cuales se optó por el análisis de la sustitución de los buses tipo MB. En la revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado, se seleccionó al bus eléctrico Yutong ZK6127BEV como sujeto de análisis. También se encontraron datos requeridos para el estudio de viabilidad tales como: cantidad de carreras anuales, distancia de recorrido por carrera y distancia recorrida por bus anualmente.

Objetivo específico 2. Sobre la infraestructura eléctrica

Se determinó la infraestructura eléctrica requerida y el diseño de la acometida para la alimentación de los buses eléctricos en una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos, basado en el Código eléctrico de Costa Rica. Se definió el diagrama unifilar de la infraestructura eléctrica, la cual es capaz de alimentar 4 cargadores de 160 kW simultáneamente, siendo suplidos por un transformador de 750 kVA.

Objetivo específico 3. Sobre el análisis de costo de vida útil

Se desarrolló un análisis de costo de ciclo de vida útil tanto para el bus eléctrico como para el bus de combustión interna, donde se tomaron en cuenta los costos de adquisición, operación, mantenimiento y descarte, que permitió la comparación entre ambos. En dicho análisis se encontró que el TCO de la flota de buses eléctricos, tanto como el VAN de los costos del respectivo proyecto, son ambos menores que el de la flota de buses diésel nuevos, en un 12,50% y 5,70% respectivamente.

Objetivo específico 4. Sobre el impacto ambiental

Se estableció el impacto ambiental y a la salud generado por una eventual conversión de la flota de buses de combustión interna a buses eléctricos en términos de emisiones de gases contaminantes en la empresa de transporte público, determinando un 97,42% de ahorro en emisiones de CO₂ directas al utilizar buses eléctricos en lugar de buses de combustión interna.

Recomendaciones

- Se recomienda la digitalización del sistema de facturas de costos, donde se adjunten características de las facturas tales como: fecha, monto, pequeña descripción, foto legible de la factura y concepto (administración, mantenimiento, insumos de limpieza, capacitación, etc). Al digitalizar el sistema, la captura de datos será más precisa y se podrá identificar patrones de gastos que actualmente se pasan por alto. Digitalizar la información permite un seguimiento más eficiente del presupuesto.
- Se recomienda la implementación de historiales de mantenimiento por bus y una base de datos para los mismos. Llevar un registro histórico de las intervenciones de mantenimiento permite encontrar patrones de fallos. Dichos historiales de mantenimiento permitirían la implementación de KPIs tales como cantidad de intervenciones por bus, tiempos medio entre fallas, tiempos medios de reparación, entre otros indicadores.
- Se recomienda la promoción del mantenimiento preventivo de los buses, con el fin de potenciar al máximo el rendimiento de los buses y disminuir las intervenciones correctivas.
- Si se implementasen los buses eléctricos en la flota: capacitar a los choferes para optimizar el uso de la energía, conduciendo con suavidad evitando aceleraciones y frenados bruscos y maximizar el frenado regenerativo, esto con el fin de disminuir costos operativos; implementar un sistema de control para los cargadores, para maximizar su salud durante su vida útil; seguir buenas prácticas de carga como no desconectar los buses hasta llegar al 100% de carga y no dejar que las baterías lleguen

a un punto de descarga, intentando cargar las baterías antes de que lleguen al 20% de su capacidad; dar seguimiento a las temperaturas alcanzadas en las baterías.

Capítulo 6. Bibliografía

Aamodt, A., Cory, K., & Coney, K. (abril de 2021). *ELECTRIFYING TRANSIT: A GUIDEBOOK FOR IMPLEMENTING BATTERY ELECTRIC BUSES*. National Renewable Energy Laboratory.

Aldenius, M., Mullen, C., & Pettersson-Löfstedt, F. (2022). Electric buses in England and Sweden—Overcoming barriers to introduction. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA). (2020). *Código Eléctrico Nacional*.

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (19 de Abril de 2023). *Tarifas de combustibles*. Obtenido de <https://aresep.go.cr/datos-abiertos/tarifas-de-combustibles/>

AUTORIDAD REGULADORA DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS. (2014). *MODELO PARA EL ESTABLECIMIENTO DE PRECIOS DE REFERENCIA PARA EL SERVICIO DE TRANSPORTE DE ESTUDIANTES EN RUTAS QUE CONTRATA EL MINISTERIO DE EDUCACIÓN PÚBLICA, BAJO LA MODALIDAD DE SERVICIOS ADJUDICADOS*. Obtenido de <http://www.pgrweb.go.cr/DOCS/NORMAS/1/VIGENTE/S/2010-2019/2010-2014/2014/12F8E/FC9A2.HTML>

AUTORIDAD REGULADORA DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS. (2023). *FIJACIÓN DE OFICIO DE LA TARIFA PROMOCIONAL PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA ASOCIADO Y DEDICADO A LOS CENTROS DE RECARGA EN*

PLANTEL PARA AUTOBUSES ELÉCTRICOS. Obtenido de <https://aresep.go.cr/resoluciones-intendencia-energia-2023/re-0021-ie-2023/>

Ayeter, G. K., Mbonigaba, I., Sunnu, A. K., & Nyantekyi-Kwakye, B. (2021). Impact of replacing ICE bus fleet with electric bus fleet in Africa: A lifetime assessment. *Energy*.

Banco Central de Costa Rica. (2023). Expectativas de inflación a 12 meses. Obtenido de <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20761>

Banco de Costa Rica. (5 de mayo de 2023). *Tasas de Interés para CDPs*. Obtenido de https://www.bancobcr.com/wps/portal/bcr/bancobcr/personas/inversiones/certificados_de_deposito_a_plazo/tasas_de_interes_para_cdps/

Becerra, L., Castillo, M., Galarza, S., Ibañez, M., López, G., & Nuñez, A. (2020). Especificaciones técnicas para buses eléctricos y sus sistemas de recarga en el Área Metropolitana de San José, Costa Rica.

Byrne, L., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2021). Urban transport assessment of emissions and resource demand of climate protection scenarios. *Cleaner Environmental Systems*.

Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales (CIEMI). (2021). *Manual para Redes Eléctricas de Distribución Subterránea*.

Cueva, E., Lucero, J., Guzmán, A., Rocha, J., & Espinoza, L. (2018). Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices. *Enfoque UTE*.

Curry, C. (2017). Lithium-ion battery costs and market. *Bloomberg New Energy Finance*.

- Dagnino, J. (2014). Coeficiente de correlación lineal de Pearson. *Chil Anest.*
- Du, J., Li, F., Li, J., Wu, X., Song, Z., Zou, Y., & Ouyang, M. (2019). Evaluating the technological evolution of battery electric buses: China as a case. *Energy.*
- Duffner, F., Wentker, M., Greenwood, M., & Leker, J. (2020). Battery cost modeling: A review and directions for future research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- Dumrauf, G. L. (2003). Técnicas de evaluación de proyectos de inversión.
- Ellram, L. M. (2002). Total Cost of Ownership.
- Fallas, J. (2012). Correlación lineal. *Midiendo la relación entre dos variables.*
- Gabriel, N. R., Martin, K. K., Haslam, S. J., Faile, J. C., Kamens, R. M., & Gheewala, S. H. (2021). A comparative life cycle assessment of electric, compressed natural gas, and diesel buses in Thailand. *Journal of Cleaner Production .*
- Gobierno de Costa Rica. (2018). Plan de Descarbonización. San José, Costa Rica. Obtenido de <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- Gobierno de Costa Rica. (2018). Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030. San José, Costa Rica. Obtenido de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4202/388-13.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gobierno de Costa Rica. (2022). Reporte de avances en la implementación del PLAN NACIONAL DE DESCARBONIZACIÓN al 2021. San José. Obtenido de

<https://dev.cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/02/Reporte-final-de-Descarbonizacion-Preview.pdf>

Herrera, W. (17 de septiembre de 2020). Ticos ahorrarán un 38% con exoneración en repuestos de autos eléctricos. *La República*.

Instituto Meteorológico Nacional. (2022). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. *Duodécima edición*.

Kruse, C. (2021). ¡Buses Eléctricos para Costa Rica! Obtenido de https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2022_Buses_electricos_para_Costa_Rica.pdf

Lajunen, A. (2018). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. *Journal of cleaner production*.

Li, X., Castellanos, S., & Maassen, A. (2018). Emerging trends and innovations for electric bus adoption—a comparative case study of contracting and financing of 22 cities in the Americas, Asia-Pacific, and Europe. *Research in Transportation Economics*.

Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z. J., & Miao, L. (2019). Charging network planning for electric bus cities: a case study of Shenzhen. *Sustainability*. China.

Liu, D., Song, Y., Li, L., Liao, H., & Peng, Y. (2018). On-line life cycle health assessment for lithium-ion battery in electric vehicles. *Journal of cleaner production*.

Liu, Y., Wang, L., Zeng, Z., & Bie, Y. (2022). Optimal charging plan for electric bus considering time-of-day electricity tariff. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*.

Logan, K. G., Nelson, J. D., & Hastings, A. (2020). Electric and hydrogen buses: Shifting from conventionally fuelled cars in the UK. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

McGrath, T., Blades, L., Early, J., & Harris, A. (2022). UK battery electric bus operation: Examining battery degradation, carbon emissions and cost. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

Mercedes-Benz Bus. (s.f.). O500 RS 1836-30 [Brochure]. Obtenido de https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/es_AR/models/o500-rs/pdf/O500%20RS%201836-30.pdf

MINAE. (2015). Plan Nacional de Energía 2015-2030. San José, Costa Rica.

MINAE. (2021). *Costo diario de buses eléctricos es cinco veces menor a los de diésel, según primeros resultados de plan piloto*. Obtenido de Dirección de cambio climático: <https://cambioclimatico.go.cr/costo-diario-buses-electricos-cinco-veces-menor-diesel-resultados-plan-piloto/>

Ministerio de Salud de Costa Rica. (2016). Informe de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Costa Rica 2013-2015. Obtenido de <https://www.binasss.sa.cr/opac-ms/media/digitales/Informe%20de%20la%20calidad%20del%20aire.%20Area%20Metropolitana%20de%20Costa%20Rica.%202013-2015.pdf>

- Nanaki, E. A., Koroneos, C. J., Roset, J., Susca, T., Christensen, T. H., Hurtado, S. D., & López-Jiménez, P. A. (2017). Environmental assessment of 9 European public bus transportation systems. *Sustainable cities and society*.
- Ortega, S. F. (2018). *Análisis del comportamiento del transporte público a nivel mundial*.
- Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019). Electric bus: A critical overview on the dawn of its widespread uptake. *Advanced Sustainable Systems*.
- Pelletier, S., Jabali, O., Mendoza, J. E., & Laporte, G. (2019). The electric bus fleet transition problem. *Transportation Research Part C*.
- Rahmani, R., Aliabadi, M., Golmohammadi, R., Babamiri, M., & Farhadian, M. (2021). Evaluation of cognitive performance of City bus drivers with respect to noise and vibration exposure. *Acoustics Australia*.
- RECOPE. (2021). *Poder calórico*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/productos/calidad-y-seguridad-de-productos/poder-calorico/>
- RITEVE. (2021). REVISION TÉCNICA VEHICULAR ANUARIO 2020. Obtenido de <https://empresariosdelcombustible.com/wp-content/uploads/2021/07/AnuarioRiteve2020.pdf>
- Rodman Oprešnik, S., Seljak, T., Vihar, R., Gerbec, M., & Kutrašnik, T. (2018). Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies. *Energies*.
- Romero, J., & Ramírez, P. (2020). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE BUSES ELÉCTRICOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE SANTIAGO

RED. Santiago. Obtenido de
https://www.swisscontact.org/_Resources/Persistent/b/6/0/d/b60d0595293dc9f6ea9654b5808575a6e082ce00/CalacPlus_Estudio-An%C3%A1lisis-LCA-Buses-El%C3%A9ctricos_Final.pdf

SÁNCHEZ, J., ALVAREZ, R. G., & STALYN, J. (2018). *INVESTIGACIÓN DE LOS PROCESOS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE VEHÍCULOS ARTICULADOS EN ECUADOR MEDIANTE EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS RUTINAS DE MANTENIMIENTO DEL BUS ELÉCTRICO (K11A) BYDCON SU SIMILAR DE MOTOR DE COMBUSTIÓN.*

Scania. (2018). Especificaciones técnicas Scania K 360 IB 6x2 [PDF]. Obtenido de <https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/ar/products-and-services/buses-and-coaches/larga-distancia/2018/especificaciones-tecnicas/K-360-IB-6x2-27042018.pdf>

Sistema Costarricense de Información Jurídica. (s.f.). *Adición del artículo 46 Bis y el Transitorio VIII a la Ley 7600, Igualdad de Oportunidades para las personas con discapacidad.* Obtenido de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=58505&nValor3=64871&strTipM=TC

Sistema Costarricense de Información Jurídica. (s.f.). *Ley de la Administración Financiera de la República y Presupuestos Públicos N° 8131.* Obtenido de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=47258&nValor3=73503

Sistema Costarricense de Información Jurídica. (s.f.). *Reforma Ley 6879 creando Impuesto 1% Valor Aduanero Mercancías Importadas*. Obtenido de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=36483&nValor3=38465&strTipM=TC

Sunitiyoso, Y., Belgiawan, P. F., & Rizki, M. (2022). Public acceptance and the environmental impact of electric bus services. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

Sustainable mobility for all. (2021). Movilidad eléctrica sostenible: Componentes esenciales y recomendaciones de políticas. Obtenido de https://www.sum4all.org/data/files/buildingblocksandpolicyrecommendations_spanish_0.pdf

Tantra, A. R., Ani, D. A., & Jayanti, F. D. (2021). The effect of roa, roe and roi on company value. *The Accounting Journal of Binaniaga*.

Capítulo 7. Apéndices

Apéndice 1. Cálculos de calibres de conductores de líneas, neutro y tierra, diámetros de ductos, disyuntores, selección del transformador y caídas de voltaje, para el diseño de la infraestructura eléctrica.

Cálculo del calibre de los conductores, capacidad de los breakers, tamaño de los ductos y caída de voltajes de los circuitos ramales

Al ser los cargadores de doble pistola, se pueden cargar el total de los buses con la mitad de su número en cargadores, siendo 4 cargadores los dispuestos en el diseño. El cargador al usarse de manera dual carga dos buses simultáneamente un total de 3,2 horas bajo las condiciones que aclara las características del equipo en el apéndice 1. Debido a que esta duración probable es de más de 3 horas, según las definiciones del NEC los cargadores serían cargas continuas, por lo que el artículo 210.19(A)(1)(a) establece que el calibre mínimo del conductor del circuito ramal debe tener una ampacidad permitida no menor que la carga no continua (no presente) más el 125% de la carga continua. En el caso de los cargadores, ellos cuentan con una corriente de entrada trifásica de 194,39 A.

Tabla 36. Características de los circuitos ramales.

Circuito	Voltaje trifásico (V)	Potencia de la carga (kW)	FP	Corriente de la carga (A)
C1	480	160	0,99	194,39
C2	480	160	0,99	194,39
C3	480	160	0,99	194,39
C4	480	160	0,99	194,39

Nota: elaboración propia en base a datos obtenidos del **anexo 1**.

Para el cálculo de la corriente se empleó la siguiente fórmula:

$$I_L = \frac{kW * 1000}{\sqrt{3} * V * F.p.}$$

Donde:

I_L : Corriente de línea

kW : consumo de potencia de la carga en kW

$F.p.$: Factor de potencia

Para la selección del calibre de los conductores, se requiere también tener en cuenta el factor de corrección por temperatura, establecido en la tabla 310.15(B)(2)(a) del NEC, por lo que se requirió saber la temperatura pico en el plantel Gafeso, la cual es de 29°C.

Tabla 37. Temperaturas mínimas y máximas en San Isidro de El General.

Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Máxima	28 °C	29 °C	29 °C	29 °C	28 °C	27 °C	27 °C	27 °C	27 °C	27 °C	27 °C	27 °C
Temp.	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C
Mínima	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	20 °C	20 °C	21 °C	21 °C

El artículo antes mencionado no castiga ni premia a conductores en una temperatura ambiente entre 26-30°C. Con lo antes mencionado, se obtiene la corriente de diseño para la selección de los calibres de los conductores.

Tabla 38. Cálculo de corriente de diseño para selección de breakers en los circuitos ramales.

Circuito	Corriente de la carga (A)	FC por carga continua	FC por temperatura	Corriente final con ambos factores FC (A)
C1	194,39	1,25	1	242,99
C2	194,39	1,25	1	242,99
C3	194,39	1,25	1	242,99
C4	194,39	1,25	1	242,99

Nota: elaboración propia basada en datos del NEC y de los cargadores.

Al ser el sistema trifásico, cuenta con 3 líneas, neutro y tierra. La configuración utilizada para la conducción de los cables a los cargadores es de las tres líneas, el neutro y la tierra en un mismo ducto enterrado. Al tener los cargadores de los buses componentes electrónicos, según las definiciones del NEC califican como cargas no lineales. Por lo tanto, el neutro de dichos cargadores califica como portador de corriente, por lo que se debe contar en el factor de corrección por agrupación. Elegida la configuración de un conductor por línea y todos los cables en un ducto, se tendrían 4 cables portadores de corriente en cada ducto, por lo que según la tabla 310.15(B)(3)(a) del NEC se deben castigar los valores de la tabla 310.15(B)(16) del NEC entre otras. Esta última tabla es la que nos permite seleccionar el calibre de los conductores. En la siguiente tabla se encuentra la corriente máxima que debe soportar los conductores de la última tabla del NEC mencionada.

Tabla 39. Cálculo de corriente de diseño para selección del calibre de los conductores en los circuitos ramales

Circuito	Corriente de diseño (A)	# de conductores por fase	Corriente por conductor (A)	FC por carga continua	FC por agrupación	Corriente de diseño final (A)
C1	194,39	1	194,39	1,25	80%	303,74
C2	194,39	1	194,39	1,25	80%	303,74
C3	194,39	1	194,39	1,25	80%	303,74
C4	194,39	1	194,39	1,25	80%	303,74

Nota: elaboración propia basada en datos del NEC y de los cargadores.

Para la selección del breaker se debe tener en cuenta el artículo 625.40 del NEC, el cual establece un factor de corrección a las cargas continuas, por lo cual se deben aumentar en un 125%. La selección del valor en amperes del breaker se da gracias al artículo 240.6(A) del NEC. En la siguiente tabla se selecciona el breaker a utilizar en los circuitos ramales.

Tabla 40. Selección de breakers en los circuitos ramales.

Circuito	Corriente de la carga (A)	FC por carga continua	Corriente de diseño (A)	Capacidad del breaker (A)
C1	194,39	1,25	242,99	3P/ 250
C2	194,39	1,25	242,99	3P/ 250
C3	194,39	1,25	242,99	3P/ 250
C4	194,39	1,25	242,99	3P/ 250

Nota: elaboración propia basada en datos del NEC y de los cargadores.

Una vez obtenida la capacidad del breaker, se procede a seleccionar el calibre de los conductores de puesta a tierra según la tabla 250.122 del NEC. Ya que la capacidad del breaker es de 250 A, está en medio de lo estipulado en la tabla para 200 A y 300 A, por lo que se selecciona la opción que generaría un calibre más grueso, y por lo tanto se escoge un calibre para el conductor de puesta a tierra de #4 AWG.

Ya teniendo el calibre del conductor de puesta tierra, se selecciona el calibre de los conductores de líneas, y se obtiene su total de área transversal con la tabla 5 del capítulo 9, para posteriormente seleccionar conductos, los cuales serán EMT, por lo que sus dimensiones se encuentran en la tabla 4 del capítulo 9.

Tabla 41. Selección del calibre de los conductores en los circuitos ramales, además del dimensionamiento de los ductos.

Circuito	Conductor por fase y neutro	Conductor para la tierra	Área del conductor para líneas (mm ²)	Área total de los conductores de línea (mm ²)	Área del conductor para conductor de puesta a tierra (mm ²)	Área de los conductores más neutro y tierra (mm ²)	Tamaño comercial del ducto (in)	Área total del ducto (mm ²)
C1	1x #350 AWG THHN	1x #4 AWG THHN	338,2	1352,8	55,16	1407,96	2-1/2"	5858
C2	1x #350 AWG THHN	1x #4 AWG THHN	338,2	1352,8	55,16	1407,96	2-1/2"	5858
C3	1x #350 AWG THHN	1x #4 AWG THHN	338,2	1352,8	55,16	1407,96	2-1/2"	5858
C4	1x #350 AWG THHN	1x #4 AWG THHN	338,2	1352,8	55,16	1407,96	2-1/2"	5858

Nota: elaboración propia en base a datos del NEC.

Según el artículo 210.19(A) del NEC, en su nota informativa nro. 4 se estipula que los conductores para circuitos ramales deben ser dimensionados para que la caída de tensión no exceda el 3% en la salida más lejana. En la Tabla 9 del capítulo 9 del NEC se encuentra la reactancia de los alambres y también su resistencia en corriente alterna en Ohms por kilómetro, también como la fórmula que permite unir ambos datos en una impedancia eficaz (Z_e).

$$Z_e = R * P.F. + X_L * \sin(\cos^{-1}(P.F))$$

Los porcentajes de caída de voltaje son obtenidos con la siguiente formula:

$$\%CV = \left(\frac{\sqrt{3} * \frac{Z_e}{1000} * l * I}{V_L} \right) * 100$$

Donde:

$\%CV$: porcentaje de caída de tensión

l : longitud en metros desde la carga a la caja de conexiones

I : corriente del circuito

Tabla 42. Cálculo de la caída de voltaje porcentual en los circuitos ramales.

Circuito	Distancia desde la caja de conexiones hasta el circuito (m)	Corriente de la carga (A)	R(Ω)	XL(Ω)	FP	Z	%CV
C1	4,10	194,39	0,128	0,164	0,990	0,150	0,043%
C2	11,62	194,39	0,128	0,164	0,990	0,150	0,122%
C3	19,34	194,39	0,128	0,164	0,990	0,150	0,203%
C4	27,39	194,39	0,128	0,164	0,990	0,150	0,288%

Nota: elaboración propia en base a datos del NEC.

Cálculo de la capacidad del transformador; calibre de los conductores, capacidad de los breakers, tamaño de los ductos y caída de voltajes de los circuitos primario y secundario del transformador

Para el cálculo de la capacidad del transformador se obtuvieron las potencias aparentes de todas las cargas, y ya que por las noches se cargarían todos los buses simultáneamente, el transformador debe ser capaz de soportar la suma de todas las potencias

aparentes. Para obtener dicha potencia aparente total, sabiendo que todas las cargas son iguales, se emplea la siguiente formula:

$$S = \frac{P}{F.P.} * \#de\ cargadores$$

En la siguiente tabla se evidencian características de los cargadores y su potencia aparente total percibida por el transformador.

Tabla 43. Cálculo de la potencia aparente total del alimentador principal.

Potencia de un cargador (kW)	cantidad de cargadores	Potencia activa total (kW)	FP	Corriente de un cargador (A)	Voltaje de operación de los cargadores (V)	Potencia aparente de un cargador (kVA)	Potencia aparente total (kVA)
160	4	640	0,99	194,39	480	161,62	646,46

Nota: Elaboración propia en base a datos del **anexo 1**.

Ya que la potencia aparente total es de 646,46 kVA se selecciona un transformador de 750 kVA de capacidad. En la siguiente tabla se muestran las corrientes para el lado primario y secundario del transformador.

Tabla 44. Cálculo de las corrientes en el primario y secundario del transformador.

Voltaje de línea del lado primario (V)	Voltaje de línea del lado secundario (V)	Potencia del transformador comercial (kVA)	Corriente del lado primario (A)	Corriente del lado secundario (A)
34500	480	750	12,55	902,11

Nota: elaboración propia.

Las corrientes fueron calculadas con la siguiente formula:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * V}$$

Para el lado primario:

Como ya se había visto anteriormente, no se castiga por temperatura. No obstante, el artículo 215.2(1)(a) del NEC indica que si en el circuito alimentador hay cargas continuas estas se deben castigar con un factor de corrección. La configuración que se utilizó para el diseño es de un conductor por línea más el neutro todo en un ducto metálico. Para seleccionar el calibre de los conductores se utilizó la tabla 310.15(B)(16) del NEC, para dimensionar su área transversal se empleó la tabla 5 del capítulo 9 del NEC y para seleccionar el ducto se utilizó la tabla 4 del capítulo 9 del NEC.

Tabla 45. Cálculo de la corriente de diseño del lado primario, selección de su calibre de conductor y dimensionamiento del ducto.

Corriente del primario (A)	Factor de carga continua	Corriente de diseño (A)	Corriente para conductor (A)	Conductor seleccionado de cobre para líneas y neutro	Área del conductor para líneas y neutro (mm ²)	Área total de los conductores de línea y neutro (mm ²)	Tamaño comercial del ducto (in)	Área total del ducto (mm ²)
12,55	1,25	15,69	15,69	1x 14 AWG RHW	18,90	75,60	1/2"	196

Nota: Elaboración propia en base a datos del NEC.

No obstante, a pesar de tener estos cálculos en base al NEC, el Manual para Redes Eléctricas de Distribución Subterránea del CIEMI indica que el calibre mínimo para conductores de mediana tensión en cobre es de 1/0 y el diámetro mínimo del ducto ha de ser de 150 mm, por lo que se selecciona un ducto de 6”.

Para el lado secundario:

En el lado secundario se seleccionó el breaker principal de la instalación, haciendo uso de la tabla 450.3(A) del NEC, en donde se escogerá un interruptor automático en la fila de “cualquier lugar”, por lo que el valor de breaker no debe ser menor al 125% de la corriente. Se escoge el valor nominal en amperes del breaker según el artículo 240.6. En la siguiente tabla se ven los valores de la capacidad mínima del breaker en amperes y también el valor en amperes del breaker seleccionado.

Tabla 46. Selección del breaker en el lado secundario del transformador.

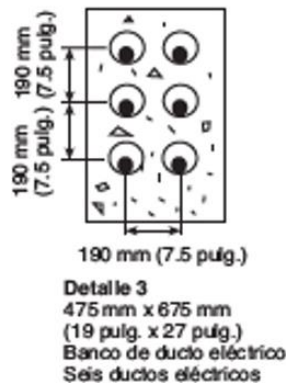
Corriente en el secundario (A)	Valor de ajuste máximo de protección contra sobre corrientes para transformadores	Corriente de diseño (A)	Breaker seleccionado
902,11	1,25	1127,64	1200 A / 3P

Nota: elaboración propia en base a datos del NEC.

Para llevar los conductores del transformador al tablero principal se diseñó pensando en utilizar el detalle 3 de la figura B.310.15(B)(2)(2) el cual se muestra de siguiente:

Figura 28.

Figura B.310.15(B)(2)(2) del NEC



Nota: Fuente (Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA), 2020)

En esta configuración, se planea mandar 6 conductores por línea, 6 conductores del neutro y 6 conductores a tierra, por lo que habría un total de 30 cables en los 6 conductos, 5 conductores por ducto. De los 5 conductores mencionados, 4 son portadores de corriente (3 de líneas y uno de neutro) por lo que según la tabla 310.15(B)(3)(a) del NEC se deben castigar los valores de la tabla 310.15(B)(16) del NEC entre otras por un factor de agrupamiento. También, debido a las razones mencionadas en este apéndice, no se penaliza por la temperatura. En la siguiente tabla se calcula el valor de la máxima ampacidad en amperes que debe soportar los calibres que se encuentran en la tabla 310.15(B)(16):

Tabla 47. Cálculo de la corriente de selección de conductor en el secundario.

Corriente de diseño (A)	FC continua	# de conductores por fase	Corriente por conductor (A)	FC por agrupación	Corriente de diseño final (A)
902,11	125%	6	187,94	80%	234,92

Nota: elaboración propia en base a datos del NEC.

Una vez obtenida la corriente final de diseño de 234, 92 A se selecciona el calibre de los conductores de las líneas y del neutro de la tabla 310.15(B)(16) del NEC. También, con el breaker ya seleccionado se selecciona el calibre de los conductores de puesta a tierra según lo estipulado en la tabla 250.122 del NEC. Para dimensionar el área transversal de los conductores se empleó la tabla 5 del capítulo 9 del NEC y para seleccionar el ducto se utilizó la tabla 4 del capítulo 9 del NEC. En la siguiente tabla se encuentran los calibres utilizados para todos los conductores y el diámetro de los ductos.

Tabla 48. Selección del calibre de conductor de lado secundario del transformador y dimensionamiento del ducto.

Conductor por fase y neutro	Calibre para conductor de tierra	Área del conductor para líneas y neutro (mm ²)	Área total de los conductores de línea y neutro (mm ²)	Área del conductor para T (mm ²)	Área de los conductores más neutro y tierra (mm ²)	Tamaño comercial del ducto (in)	Área total del ducto (mm ²)
6x 250 AGW THHN	6x 3/0 AWG THHN	256,1	1024,4	172,8	1197,2	2-1/2"	3783

Nota: elaboración propia en base a datos del NEC.

Apéndice 2. Cálculo de la correlación de los datos de la figura 24

Tabla 49. Costo del litro de diésel al cierre de cada trimestre durante los años 2015 al primer trimestre de 2023.

Costo de litro de diesel desde enero 2021 a diciembre 2022 (ARESEP)	Costo de litro de diesel según datos obtenidos	Covarianza
₡ 483,00	₡ 475,67	48040,31446
₡ 504,00	₡ 503,62	37882,30939
₡ 536,00	₡ 532,75	26926,82604
₡ 554,00	₡ 558,19	20222,31363
₡ 553,00	₡ 553,01	21141,1871
₡ 591,00	₡ 587,55	11918,04017
₡ 597,00	₡ 594,29	10563,98659
₡ 589,00	₡ 597,60	10967,81651
₡ 596,00	₡ 589,00	11236,03397
₡ 620,00	₡ 598,53	7944,398775
₡ 621,00	₡ 620,56	6011,964871
₡ 611,00	₡ 638,15	5088,527401
₡ 611,00	₡ 611,00	7625,961906
₡ 671,00	₡ 666,06	887,8076258
₡ 724,00	₡ 718,37	503,6984456
₡ 845,00	₡ 845,01	21420,45155
₡ 908,00	₡ 898,64	41937,44436
₡ 1 012,00	₡ 942,80	76946,5797
₡ 873,00	₡ 875,51	30828,5028
₡ 1 001,00	₡ 984,70	86620,95401
₡ 872,00	₡ 1 007,72	52795,32807
₡ 865,00	₡ 723,21	4914,040179
₡ 824,00	₡ 698,45	699,403928
₡ 846,00	₡ 801,93	15475,61919

Nota: elaboración propia en Microsoft Excel en base a datos obtenidos del ARESEP.

Tabla 50. Cálculo del coeficiente de correlación lineal de Pearson.

Media datos ARESEP	Media datos obtenidos de facturas	Desviación estandar datos ARESEP	Desviación estandar datos obtenidos de facturas	Coefficiente de correlación lineal de Pearson
₡ 704,46	₡ 692,60	162,325486	157,5131391	0,923565227

Nota: elaboración propia en Microsoft Excel.

Apéndice 3. Cálculo del costo de los impuestos al monto de adquisición CIF de los buses eléctricos Yutong ZK6127BEV

Para el cálculo de los impuestos al monto CIF se tuvieron en cuenta los siguientes incentivos a la importación de vehículos eléctricos:

El artículo 9 del reglamento de *Incentivos y promoción para el transporte eléctrico N° 9518* del 25 de enero de 2018 establece que, a partir de la publicación de dicho reglamento, a los vehículos eléctricos se les grabará un impuesto de 1% más un 1% por cada año transcurrido, en este caso sería un total de un 6%. Dicho artículo también indica que durante los primeros 36 meses a partir de la publicación del reglamento los vehículos estarán exentos del impuesto selectivo de consumo y sobre el valor aduanero, y al paso de 36 meses serían exentos de un 75%, 36 meses después de 50%, los 36 meses siguientes pagará un 25% menos y a partir de los 12 años pagará el total de los impuestos correspondientes. El año 2023 se ubica en el periodo donde se exonera el 75% de dicho impuesto. Este último impuesto graba un 25% del valor CIF de los vehículos eléctricos (Herrera, 2020). También se le agrega un 1% debido a la *ley 6879*, la cual establece el impuesto de valor aduanero de mercancías importadas (Sistema Costarricense de Información Jurídica, s.f.).

Por lo tanto, conociendo las exoneraciones y los impuestos se procede a calcular el total de impuestos de la flota de buses Yutong al ingresar a Costa Rica.

Tabla 51. Cálculo del impuesto total de importación de la flota de 8 buses eléctricos.

Valor CIF	\$ 2 828 800,00
IVA (6%)	\$ 169 728,00
Impuesto selectivo de consumo (6,25%)	\$ 176 800,00
Ley 6879 (1%)	\$ 28 288,00
Impuestos totales	\$ 374 816,00
Monto con impuestos	\$ 3 203 616,00

Nota: elaboración propia.

Sumando la cantidad de impuestos sin ninguna exoneración, obtendríamos un 39% de impuestos. No obstante, con el cálculo realizado se obtuvo un 13,25% de impuestos.

También, el artículo 34 del reglamento de *Incentivos y promoción para el transporte eléctrico N° 9518* indica que los cargadores de los vehículos eléctricos están totalmente libres de los impuestos de importación.

Apéndice 4. Cálculo del costo de la infraestructura eléctrica

El costo estimado de sección de mediana tensión fue estimado en base a una cotización realizada por Alta Sánchez S.A.

Tabla 52. Cotización de la instalación de la acometida trifásica, cableado de alta tensión y compra e instalación del transformador.

CServicios			
Línea	Cantidad	Descripción	Costo
1	1	Transformador de 750 kVA 34.5 kV 277/480 V	c 20,918.000.00
2	global	Transporte y servicio de grúa para instalación de equipos	c 382.000.00
3	global	Prueba de Hipot a cable de media tensión	c 491.400.00
4	global	Mano de Obra civil	c 4,750.000.00
5	1	Mano de obra eléctrica	c 3,485.000.00
6	1	Materiales	c 3,450.00.00
7	1	Poste de 13 m	c 395,000.00
8	----	Total	c 33,871.400.00

Nota: Cotización realizada por Alta Sánchez S.A.

Los artículos con la casilla de “marca” vacías se deben a que el vendedor no especificó la marca.

Tabla 53. Cálculo del costo de los materiales de la instalación de la infraestructura eléctrica.

Artículo	Marca	Cantidad	Precio de unidad (C)	Total (C)
Conductor #350 AWG THHN negro		65,5725 m	C 25 000,00	C 1 639 312,50
Conductor #350 AWG THHN blanco		65,5725 m	C 25 000,00	C 1 639 312,50
Conductor #350 AWG THHN rojo		65,5725 m	C 25 000,00	C 1 639 312,50
Conductor #350 AWG THHN azul		65,5725 m	C 25 000,00	C 1 639 312,50
Conductor #4 AWG THHN verde		65,5725 m	C 2 800,00	C 183 603,00
Conductor #250 AWG THHN negro		25,2 m	C 17 000,00	C 428 400,00
Conductor #250 AWG THHN blanco		25,2 m	C 17 000,00	C 428 400,00
Conductor #250 AWG THHN rojo		25,2 m	C 17 000,00	C 428 400,00
Conductor #250 AWG THHN azul		25,2 m	C 17 000,00	C 428 400,00
Conductor #3/0 AWG THHN verde		25,2 m	C 10 500,00	C 264 600,00
EMT 2-1/2"		95 m	C 34 000,00	C 1 076 666,67
Disyuntor 3P/250A		4	C 631 343,79	C 2 525 375,16
Disyuntor 3P/1200A	Merlin Gerin	1	C 2 841 412,00	C 2 841 412,00
Tablero 1200A	Schneider	1	C 3 000 000,00	C 3 000 000,00
Tablero 250A	Siemens	4	C 839 300,00	C 3 357 200,00
Varilla de cobre		1	C 19 950,00	C 19 950,00
Base de medidor de 3m 5/8"	EATON	1	C 50 000,00	C 50 000,00
Total				C 21 589 656,83

Ya que la parte de mediana tensión de la obra fue cotizada en una empresa privada, los honorarios profesionales para el ingeniero a cargo irían en base a la tabla anterior únicamente. Dichos honorarios están establecidos en el *Decreto Ejecutivo N° 18636-MOPT - ARANCEL DE SERVICIOS PROFESIONALES DE CONSULTORÍA PARA EDIFICACIONES*.

Tabla 54. Cálculo del cobro por honorarios del ingeniero a cargo de la obra.

	Porcentaje sobre el total del costo de los materiales	Costo por rubro
Estudios preliminares para anteproyecto	0,5%	₡ 107 948,28
Anteproyecto	1,5%	₡ 323 844,85
Planos de construcción y especificaciones técnicas	3,0%	₡ 647 689,70
Inspección	3,0%	₡ 647 689,70
Dirección técnica/ dirección de obra	5,0%	₡ 1 079 482,84
Administración	12,0%	₡ 2 590 758,82
Costo total por honorarios para el ingeniero a cargo		₡ 5 397 414,21

Nota: elaboración propia.

Apéndice 5. Cálculo de los costos relacionados al consumo de energía para las flotas 8 buses diésel y eléctricos a los 15 años

Para el cálculo de los costos de energía se siguió el procedimiento del cálculo de dicho rubro establecido en la *Metodología para la Fijación Ordinaria de Tarifas para el Servicio Remunerado de Personas Modalidad Autobús* del ARESEP. El precio del litro de diésel fue tomado del precio establecido por el ARESEP que empezó a regir el día 1 de abril de 2023 (₡ 634/L) y el precio por kWh se obtuvo de la resolución *RE-0021-IE-2023 FIJACIÓN DE OFICIO DE LA TARIFA PROMOCIONAL PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA ASOCIADO Y DEDICADO A LOS CENTROS DE RECARGA EN PLANTEL PARA AUTOBUSES ELÉCTRICOS*, donde se fija una tarifa promocional para los buses eléctricos denominada T-BE, la cual es de ₡ 53,41/kWh. La fórmula para el cálculo del costo de energía mensual es la siguiente:

$$CCe = cce * (1 + ccsr) * D * (1 + cki) * CM * Pe$$

Donde:

CCe: costo mensual en consumo de energía (C)

cce: coeficiente de consumo de energía (L/km o kWh/km)

ccsr: Coeficiente de ajuste de acuerdo con las condiciones de la superficie de rodamiento del recorrido, donde para recorridos con secciones no pavimentadas iguales o menores a 20% es 0.

D: Distancia de la carrera (135 km)

cki: coeficiente de ajuste por reconocimiento de kilometraje improductivo, donde para rutas no urbanas (25 km o más) es de 0,05.

CM: Cantidad de carreras mensuales de los buses tipo MB en base al horario actual (297,41)

Pe: precio promedio de la energía (diésel: C 634/L; electricidad: C 53,41/kWh)

Cálculo del costo mensual de consumo de energía de la flota de 8 buses diésel:

$$CCe = 0,46 * (1 + 0) * 135 * (1 + 0,05) * 297,41 * 634 = \text{C } \mathbf{12\ 294\ 813,30}$$

Cálculo del costo mensual de consumo de energía de la flota de 8 buses eléctricos:

$$CCe = 0,87 * (1 + 0) * 135 * (1 + 0,05) * 297,41 * 53,41 = \text{C } \mathbf{1\ 958\ 919,91}$$

Apéndice 6. Análisis financiero para la adquisición de la flota de 8 buses eléctricos

El análisis financiero del caso se basó en los datos obtenidos en los costos del análisis de resultados del objetivo 3. Se realizó el análisis de los 15 años de vida útil proyectados de la flota de buses. La tasa de descuento o tasa de interés utilizada es de 8,52% y la tasa de inflación es de 4,5%, por lo que se calculó una tasa de descuento inflacionaria o “k inflacionario” de la siguiente manera:

$$k = (1 + \textit{tasa de descuento})(1 + \textit{tasa de inflación}) - 1$$

$$k = (1 + 8,52\%)(1 + 4,50\%) - 1 = 13,40\%$$

El primer flujo de caja mostrado es para los 15 años de vida útil de la flota de buses eléctricos y el segundo es para la flota de buses diésel.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Costo de inversión Compra de buses eléctricos infraestructura eléctrica	€ 1 973 777 496,31	€ 1 973 777 496,31														
Costo de mantenimiento anual	€ 104 937 282,09	€ 109 241 459,78	€ 114 157 325,47	€ 119 294 405,12	€ 124 662 651,35	€ 130 272 472,75	€ 136 134 734,02	€ 142 260 797,05	€ 148 662 532,93	€ 155 352 346,90	€ 162 343 202,51	€ 169 648 646,62	€ 177 282 833,72	€ 185 260 563,33	€ 193 597 288,68	€ 202 309 166,67
Costo de la energía anual	€ 2 597 038,86	€ 24 564 855,61	€ 25 670 274,11	€ 26 825 436,45	€ 28 032 581,09	€ 29 294 047,24	€ 30 612 279,36	€ 31 989 831,94	€ 33 429 374,37	€ 34 933 696,22	€ 36 505 712,55	€ 38 148 469,61	€ 39 868 150,75	€ 41 669 682,53	€ 43 533 941,24	€ 45 492 259,60
Costo fijo anual	€ 416 328 539,00	€ 435 063 332,26	€ 454 641 172,80	€ 475 100 025,58	€ 496 479 526,73	€ 518 821 105,43	€ 542 188 055,18	€ 566 565 617,66	€ 592 061 070,45	€ 618 703 818,62	€ 646 545 490,46	€ 675 640 037,53	€ 706 044 839,22	€ 737 815 811,99	€ 771 017 523,53	€ 805 713 312,08
Costo de adquisición del paquete de baterías	€ 111 214 046,36										€ 111 214 046,36					
Rescate del paquete original de baterías	€ 39 306 650,93										€ 39 306 650,93					
Rescate del segundo paquete de baterías	€ 22 242 809,27										€ 22 242 809,27					
Flujo neto de efectivo	€ 1 973 777 496,31	€ 568 869 638,65	€ 594 468 772,39	€ 621 219 867,14	€ 649 174 761,17	€ 678 387 625,42	€ 708 915 066,56	€ 740 816 246,65	€ 774 153 977,75	€ 808 989 861,74	€ 917 301 800,95	€ 883 437 153,77	€ 923 191 825,69	€ 964 735 457,85	€ 1 008 148 553,45	€ 1 031 272 429,09
Flujo neto de efectivo en valor actual acumulado	€ 1 973 777 496,31	€ 2 542 647 134,96	€ 3 137 115 907,34	€ 3 758 335 774,49	€ 4 407 510 535,65	€ 5 085 898 161,07	€ 5 794 813 229,63	€ 6 535 625 476,28	€ 7 309 784 454,03	€ 8 118 772 335,77	€ 9 086 074 116,73	€ 9 919 511 270,50	€ 10 842 703 056,19	€ 11 807 488 554,04	€ 12 815 587 07,49	€ 13 846 859 536,57

Tabla 55. Flujo de caja durante 15 años de operación e indicadores financieros de costos del proyecto de adquisición de flota de 8 buses eléctricos.

Inflación interanual	4,50%
Tasa de descuento	8,52%
K inflacionario	13,40%
VAN	-€5 737 064 062,19

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Costo de inversión (compra de buses diésel)	€ 1.030.348.800,00															
Costo de mantenimiento		€ 150.207.007,20	€ 156.966.322,52	€ 164.029.807,04	€ 171.411.148,35	€ 179.124.680,03	€ 187.185.289,28	€ 195.608.595,95	€ 204.410.982,76	€ 213.609.476,99	€ 223.221.903,45	€ 233.266.888,11	€ 243.763.890,12	€ 254.733.274,88	€ 266.196.271,94	€ 278.175.104,17
energía anual		€ 154.176.693,78	€ 161.114.921,99	€ 168.365.093,41	€ 175.941.322,03	€ 183.858.891,14	€ 192.132.541,24	€ 200.778.505,59	€ 209.813.538,34	€ 219.251.147,57	€ 229.121.629,21	€ 239.432.102,52	€ 250.206.547,14	€ 261.465.841,76	€ 273.231.804,64	€ 285.527.235,85
fljo-anual		€ 435.063.323,26	€ 454.641.172,89	€ 475.100.025,58	€ 496.479.232,33	€ 518.821.108,43	€ 542.168.085,18	€ 566.565.617,66	€ 592.061.070,45	€ 618.702.816,62	€ 646.545.890,46	€ 675.640.037,53	€ 706.043.839,22	€ 737.815.811,99	€ 771.017.523,53	€ 805.713.312,06
o de efectivo	€ 1.030.348.800,00	€ 739.447.289,24	€ 772.722.417,25	€ 807.494.926,03	€ 843.832.197,70	€ 881.804.646,00	€ 921.485.855,69	€ 962.952.710,20	€ 1.006.285.591,56	€ 1.051.588.443,18	€ 1.098.889.023,13	€ 1.148.339.029,17	€ 1.200.014.285,48	€ 1.254.014.928,33	€ 1.310.445.690,10	€ 1.369.415.652,10
Flujo neto de efectivo en valor actual acumulado	€ 1.030.348.800,00	€ 1.789.796.089,24	€ 2.542.518.506,49	€ 3.350.013.482,51	€ 4.193.845.830,21	€ 5.075.689.276,91	€ 5.997.136.132,50	€ 6.960.088.851,70	€ 7.966.374.442,25	€ 9.017.942.886,44	€ 10.116.851.909,57	€ 11.285.170.938,73	€ 12.485.185.242,21	€ 13.719.200.152,54	€ 15.029.645.752,64	€ 16.399.061.404,74

Tabla 55. Flujo de caja durante 15 años de operación e indicadores financieros de costos del proyecto de adquisición de flota de 8 buses diésel.

Inflación interanual	4,50%
Tasa de descuento	8,52%
K inflacionario	13,40%
VAN	-€6 083 961 794,34

Capítulo 8. Anexos

Anexo 1. Características del bus eléctrico Yutong ZK6127BEV y el cargador SZ-160

Tabla 56. Datos del bus eléctrico y el cargador Yutong.

Especificaciones de buses modelo ZK6127BEV

Artículo	Especificación	
Parámetros Básicos	Modelo	ZK6127BEV
	Largo * Ancho * Alto (mm)	11970*2550*3635
	Altura interna (mm)	1980
	Peso máximo permitido(kg)	18,000
	Eje delantero/trasero(kg)	6500/11500
	Peso vacío vehicular(kg)	13220
	Peso vacío de eje delantero/trasero(kg)	4650/8570
	Distancia entre ejes (mm)	6,050
	Voladizo delantero/voladizo trasero (mm)	2600/3320
	Distancia entre ruedas delanteras/trasera (mm)	2080/1858
	Ángulo de entrada /ángulo de salida (°)	8/8
	Capacidad máxima de pasajeros	50
	Distancia mínima al suelo (mm)	160
	Radio giro mínimo (m)	≤21.5
Eelectromotor	Modelo de Electromotor	TZ400XSYTB49
	Potencia Nominal (kW)	215
	Torque Nominal (N.m)	1260
Baterías	Modelo	CATL 350.07kWh
	Capacidad de energía	350.07kWh
	Tipo de celdas de la batería	Fosfato de Litio - Hierro
Especificación del chasis	Eje delantero	Freno de disco
	Eje trasero	Freno de disco
	Sistema de suspensión	Suspensión de airbag con 2 bolsas delanteras y 4 bolsas traseras
	Neumáticos	295/80R22.5
Decoración exterior	Asientos	49 asientos de pasajeros reclinable con cinturón de seguridad de tres puntos.
	Puertas	Dos puertas automática
Sistema de refrigeración	Parabrisas delantera	Vidrio laminado de la parabrisas delantera
	Ventanas laterales	Ventanas correderas
	Ventana de techo	Dos ventanas de techo
Sistema eléctrico	Sistema de aire acondicionado	Aire acondicionado con la capacidad de enfriamiento 32,000Kcal/h
	Luces	Faros combinados y claveras integrales
	Monitor de marcha atrás	Monitor de marcha atrás en color de 2 cámaras (segunda puerta de pasajeros + marcha atrás)

Especificaciones de Cargador

1	Modelo	SZ-160, estándar chino, carga simultánea
2	Potencia	160 KW
3	Número de pistolas	2
4	Tiempo para cargar 1 coche con una sola pistola (horas)	1.6
5	Tiempo para cargar 2 vehículos con cañones dobles al mismo tiempo (horas)	3.2
6	Tipo de voltaje de entrada	AC480V, sistema trifásico de cinco líneas
7	Frecuencia de red de CA	45 Hz ~65Hz
8	Potencia de salida nominal	160kW
9	Rango de corriente de salida	0-250A (pistola única)
10	Rango de voltaje de salida	200-750V
12	Error de voltaje de salida	≤0.5%
13	Error de corriente de salida	≤±1% (I≥30A) ≤±0.3A (I<30A)
14	Precisión de voltaje estabilizado	≤0.5%
15	Precisión de corriente estabilizada	≤1%
16	Coefficiente de ondulación	≤1%
17	Eficiencia promedia	≥95% (P≥50%)
18	Factor de potencia	≥0.99 (P≥50%)
19	Resistencia dieléctrica	Sin avería ni descarga disruptiva (DC2.8kV, DC3.5kV)
20	Resistencia de aislamiento	≥10M Ω
21	Ruido	≤65dB
22	Modo de refrigeración	Refrigeración por aire
23	Grado de protección	IP55
24	Pantalla táctil	8 pulgadas, 800*600

Nota: El tiempo de carga anterior es el tiempo de cálculo teórico para SOC del 20 % al 100 % cuando la temperatura de la batería es de 25 ° C. El tiempo de carga real se ve afectado por factores como la temperatura de la batería, la precisión del SOC, la consistencia de la celda de la batería y el cargador capacidad de salida diferencia.

Anexo 2. Cotización del bus Yutong ZK6127BEV y anotaciones

Tabla 57. Cotización realizada por Yutong.

2. Cotización

NO.	Descripción	Modelo	Precio unitario FOB	Flete Marítimo	Precio unitario CIF-Caldera	Cantidad	Precio total CIF-Caldera
1	Autobús eléctrico	ZK6127BEV	\$326,900	\$26,700	\$353,600	8	\$2,828,800
2	Cargador	Serie SZ-dos pistolas-160KW-entrada AC 480V	\$29,600	\$1,350	\$30,950	4	\$123,800
3	Precio Total		\$356,500	\$28,050	\$384,550	--	\$2,952,600
4	Repuestos		El monto de repuestos recomendado es 2% del precio total para dos años				\$59,000
Monto total							\$3,011,600

Figura 29

Consideraciones brindadas por Yutong

Anotaciones:

- 1. Garantía:** 24 meses o 150,000 kilómetros, lo que ocurra primero, Yutong ofrece garantías extendida a un costo adicional por cada año adicional a los mencionados en el párrafo anterior.
- 2. Tiempo de entrega:** La producción completará dentro de los 120 días a partir de la fecha de confirmación de recepción del pago de anticipo.
- 3. Término comercial:** CIF-Puerto Caldera de Costa Rica
- 4. Forma de pago:** El comprador pagará el anticipo de veinte por ciento (20%) del precio del contrato al vendedor mediante transferencia telegráfica (T/T) dentro de los cinco (5) días a partir de la fecha de firma del contrato. El ochenta por ciento (80%) se pagará mediante la transferencia telegráfica o emitir una carta de crédito con dolar correspondiente a este monto mismo por bancos intermediarios o directos aceptados por el vendedor veinte (20) días antes de de embarque de los productos.
- 5. Sistema de servicio de post-venta y suministro de repuestos:**
Yutong ofrece el servicio de postventa y suministro de repuestos de acuerdo con el concepto de servicio y el sistema de garantía, basados en la experiencia, profesionalismo y acompañamiento a nuestros clientes. El equipo de servicios profesional de Yutong con una actitud amistosa y responsable, acción diligente y eficiente, habilidades de servicio profesional en cualquier momento y en cualquier lugar, dedicado a proporcionar a los clientes servicios de calidad confiable.



Anexo 3. Artículos del NEC utilizados

Carga continua (Continuous Load). Carga cuya corriente máxima se prevé que circule durante tres horas o más.

Carga no lineal (Nonlinear Load). Carga en donde la forma de onda de la corriente en estado estacionario no sigue la forma de onda de la tensión aplicada.

Nota Informativa: El equipo electrónico, la iluminación de descarga eléctrica / electrónica, sistemas de velocidad variable y equipos similares pueden ser cargas no lineales.

(a) Donde un circuito ramal alimenta cargas continuas o cualquier combinación de cargas continuas y no continuas, el calibre mínimo del conductor del circuito ramal debe tener una ampacidad permitida no menor que la carga no continua más el 125% de la carga continua.

Tabla 310.15(B)(2)(a) Factores de corrección de temperatura ambiente basada en 30°C (86°F)

Para temperaturas ambientes distintas a 30°C (86°F), multiplique las ampacidades permisibles especificadas en las tablas de ampacidad por el factor de corrección apropiado mostrado a continuación.

Temperatura ambiente (°C)	Temperatura nominal del conductor			Temperatura ambiente (°F)
	60°C	75°C	90°C	
10 o menos	1.29	1.20	1.15	50 o menos
11-15	1.22	1.15	1.12	51-59
16-20	1.15	1.11	1.08	60-68
21-25	1.08	1.05	1.04	69-77
26-30	1.00	1.00	1.00	78-86
31-35	0.91	0.94	0.96	87-95
36-40	0.82	0.88	0.91	96-104
41-45	0.71	0.82	0.87	105-113
46-50	0.58	0.75	0.82	114-122
51-55	0.41	0.67	0.76	123-131
56-60	—	0.58	0.71	132-140
61-65	—	0.47	0.65	141-149
66-70	—	0.33	0.58	150-158
71-75	—	—	0.50	159-167
76-80	—	—	0.41	168-176
81-85	—	—	0.29	177-185

Tabla 310.15(B)(3)(a) Factores de ajuste para más de tres conductores portadores de corriente

Cantidad de conductores ¹	Porcentaje de los valores de las Tablas 310.15(B)(16) a 310.15(B)(19) ajustados para la temperatura ambiente, si fuera necesario
4-6	80
7-9	70
10-20	50
21-30	45
31-40	40
41 y más	35

Tabla 310.15(B)(16) (antes Tabla 310.16) Ampacidades permisibles en conductores aislados para tensiones nominales de hasta e incluyendo 2000 volts y 60° C a 90° C (140° F a 194° F). No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (enterrados directamente), basadas en una temperatura ambiente de 30° C (86° F)*.

Calibre AWG o kcmil	Temperatura nominal del conductor [Ver Tabla 310.104(A).]						Calibre AWG o kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
		Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Tipos TW, UF	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Tipos TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			
18**	—	—	14	—	—	—	—
16**	—	—	18	—	—	—	—
14**	15	20	25	—	—	—	—
12**	20	25	30	15	20	25	12**
10**	30	35	40	25	30	35	10**
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	195	230	260	300
350	260	310	350	210	250	280	350

Tabla 310.15(B)(16) (antes Tabla 310.16) Ampacidades permisibles en conductores aislados para tensiones nominales de hasta e incluyendo 2000 volts y 60° C a 90° C (140° F a 194° F). No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (enterrados directamente), basadas en una temperatura ambiente de 30° C (86° F)*.

Calibre AWG o kcmil	Temperatura nominal del conductor [Ver Tabla 310.104(A).]						Calibre AWG o kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
		Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Tipos TW, UF	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Tipos TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			
18**	—	—	14	—	—	—	—
16**	—	—	18	—	—	—	—
14**	15	20	25	—	—	—	—
12**	20	25	30	15	20	25	12**
10**	30	35	40	25	30	35	10**
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250

625.40 Protección contra sobrecorriente. El dispositivo de protección contra sobrecorriente para los alimentadores y circuitos ramales de los equipos de alimentación para vehículos eléctricos, debe dimensionarse para régimen continuo y debe tener una capacidad nominal no menor al 125 por ciento de la carga máxima del equipo de alimentación para vehículos eléctricos. Cuando haya cargas no continuas conectadas al mismo alimentador o circuito ramal, el valor nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente no debe ser menor a la suma de todas las cargas no continuas más el 125 por ciento de las cargas continuas.

240.6 Valores en amperes nominales normalizados.

(A) Fusibles e ruptores de circuito de disparo fijo. Los valores en amperes nominales normalizados de los fusibles e interruptor automático de tiempo inverso, son: 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000 y 6000 amperes. Los valores en amperes nominales normalizadas adicionales para fusibles deben ser de 1, 3, 6, 10 y 601. Debe permitirse el uso de fusibles e ruptores de circuito de tiempo inverso con valores nominales en amperes no normalizadas.

Tabla 250.122 Calibre mínimo de conductores de puesta a tierra de equipos para puesta a tierra de canalizaciones y equipos.

Valor nominal o ajuste de dispositivos automáticos contra sobrecorriente en circuitos antes del equipo, conducto, etc., sin exceder (Amperes)	Calibre (AWG o kcmil)	
	Cobre	Aluminio o aluminio recubierto de cobre*
15	14	12
20	12	10
60	10	8
100	8	6
200	6	4
300	4	2
400	3	1
500	2	1/0
600	1	2/0
800	1/0	3/0
1000	2/0	4/0
1200	3/0	250
1600	4/0	350
2000	250	400
2500	350	600
3000	400	600
4000	500	750
5000	700	1200
6000	800	1200

Nota: Cuando sea necesario cumplir con la sección 250.4(A)(5) o (B)(4), el conductor de puesta a tierra del equipo debe ser dimensionado con un calibre mayor que el dado en esta Tabla.

*Véanse las restricciones de instalación en la sección 250.120.

Tabla 250.122 Calibre mínimo de conductores de puesta a tierra de equipos para puesta a tierra de canalizaciones y equipos.

Valor nominal o ajuste de dispositivos automáticos contra sobrecorriente en circuitos antes del equipo, conducto, etc., sin exceder (Amperes)	Calibre (AWG o kcmil)	
	Cobre	Aluminio o aluminio recubierto de cobre*
15	14	12
20	12	10
60	10	8
100	8	6
200	6	4
300	4	2
400	3	1
500	2	1/0
600	1	2/0
800	1/0	3/0
1000	2/0	4/0
1200	3/0	250
1600	4/0	350
2000	250	400
2500	350	600
3000	400	600
4000	500	750
5000	700	1200
6000	800	1200

Nota: Cuando sea necesario cumplir con la sección 250.4(A)(5) o (B)(4), el conductor de puesta a tierra del equipo debe ser dimensionado con un calibre mayor que el dado en esta Tabla.

*Véanse las restricciones de instalación en la sección 250.120.

Tabla 4 Dimensiones y área porcentual de conductos y tuberías (áreas de conductos o tuberías para las combinaciones de cables permitidas en la Tabla 1, Capítulo 9)

Artículo 358 — Tubería metálica eléctrica (EMT)													
Designador métrico	Tamaño comercial	Más de 2 cables 40%		60%		1 cable 53%		2 cables 31%		Diámetro interno nominal		Área total 100%	
		mm ²	pulg. ²	mm ²	pulg. ²	mm ²	pulg. ²	mm ²	pulg. ²	mm	pulg.	mm ²	pulg. ²
16	½	78	0.122	118	0.182	104	0.161	61	0.094	15.8	0.622	196	0.304
21	¾	137	0.213	206	0.320	182	0.283	106	0.165	20.9	0.824	343	0.533
27	1	222	0.346	333	0.519	295	0.458	172	0.268	26.6	1.049	556	0.864
35	1¼	387	0.598	581	0.897	513	0.793	300	0.464	35.1	1.380	968	1.496
41	1½	526	0.814	788	1.221	696	1.079	407	0.631	40.9	1.610	1314	2.036
53	2	866	1.342	1299	2.013	1147	1.778	671	1.040	52.5	2.067	2165	3.356
63	2½	1513	2.343	2270	3.515	2005	3.105	1173	1.816	69.4	2.731	3783	5.858
78	3	2280	3.538	3421	5.307	3022	4.688	1767	2.742	85.2	3.356	5701	8.846
91	3½	2980	4.618	4471	6.927	3949	6.119	2310	3.579	97.4	3.834	7451	11.545
103	4	3808	5.901	5712	8.852	5046	7.819	2951	4.573	110.1	4.334	9521	14.753

Tabla 5 Dimensiones de conductores aislados y de cables de artefactos

Tabla 5 (Continuación)

Tipo	Calibre (AWG o kcmil)	Área aproximada		Diámetro aproximado	
		mm ²	pulg. ²	mm	pulg.
Tipos: RHH ^a , RHW ^a , RHW-2 ^a , THHN, THHW, THW, THW-2, TFN, TFFN, THWN, THWN-2, XE, XFF					
THHN, THWN, THWN-2	14	6.258	0.0097	2.819	0.111
	12	8.581	0.0133	3.302	0.130
	10	13.61	0.0211	4.166	0.164
	8	23.61	0.0366	5.486	0.216
	6	32.71	0.0507	6.452	0.254
	4	53.16	0.0824	8.230	0.324
	3	62.77	0.0973	8.941	0.352
	2	74.71	0.1158	9.754	0.384
	1	100.8	0.1562	11.33	0.446
	1/0	119.7	0.1855	12.34	0.486
	2/0	143.4	0.2223	13.51	0.532
	3/0	172.8	0.2679	14.83	0.584
	4/0	208.8	0.3237	16.31	0.642
	250	256.1	0.3970	18.06	0.711
	300	297.3	0.4608	19.46	0.766
THHN, THWN, THWN-2	350	338.2	0.5242	20.75	0.817
	400	378.3	0.5863	21.95	0.864
	500	456.3	0.7073	24.10	0.949
	600	559.7	0.8676	26.70	1.051
	700	637.9	0.9887	28.50	1.122
	750	677.2	1.0496	29.36	1.156
	800	715.2	1.1085	30.18	1.188
	900	794.3	1.2311	31.80	1.252
	1000	869.5	1.3478	33.27	1.310

Tabla 5 Dimensiones de conductores aislados y de cables de artefactos

Tabla 5 (Continuación)

Tipo	Calibre (AWG o kcmil)	Área aproximada		Diámetro aproximado	
		mm ²	pulg. ²	mm	pulg.
Tipos: RHH ^a , RHW ^a , RHW-2 ^a , THHN, THHW, THW, THW-2, TFN, TFFN, THWN, THWN-2, XE, XFF					
THHN, THWN, THWN-2	14	6.258	0.0097	2.819	0.111
	12	8.581	0.0133	3.302	0.130
	10	13.61	0.0211	4.166	0.164
	8	23.61	0.0366	5.486	0.216
	6	32.71	0.0507	6.452	0.254
	4	53.16	0.0824	8.230	0.324
	3	62.77	0.0973	8.941	0.352
	2	74.71	0.1158	9.754	0.384
	1	100.8	0.1562	11.33	0.446
	1/0	119.7	0.1855	12.34	0.486
	2/0	143.4	0.2223	13.51	0.532
	3/0	172.8	0.2679	14.83	0.584
	4/0	208.8	0.3237	16.31	0.642
	250	256.1	0.3970	18.06	0.711
	300	297.3	0.4608	19.46	0.766
THHN, THWN, THWN-2	350	338.2	0.5242	20.75	0.817
	400	378.3	0.5863	21.95	0.864
	500	456.3	0.7073	24.10	0.949
	600	559.7	0.8676	26.70	1.051
	700	637.9	0.9887	28.50	1.122
	750	677.2	1.0496	29.36	1.156
	800	715.2	1.1085	30.18	1.188
	900	794.3	1.2311	31.80	1.252
	1000	869.5	1.3478	33.27	1.310

Tabla 5 Dimensiones de conductores aislados y de cables de artefactos

Tabla 5 (Continuación)

Tipo	Calibre (AWC o kcmil)	Área aproximada		Diámetro aproximado	
		mm ²	pulg. ²	mm	pulg.
Tipos: RHH*, RHW*, RHW-2*, THHN, THHW, THW, THW-2, TFN, TFFN, THWN, THWN-2, XF, XFF					
THHN, THWN, THWN-2	14	6.258	0.0097	2.819	0.111
	12	8.581	0.0133	3.302	0.130
	10	13.61	0.0211	4.166	0.164
	8	23.61	0.0366	5.486	0.216
	6	32.71	0.0507	6.452	0.254
	4	53.16	0.0824	8.230	0.324
	3	62.77	0.0973	8.941	0.352
	2	74.71	0.1158	9.754	0.384
	1	100.8	0.1562	11.33	0.446
	1/0	119.7	0.1855	12.34	0.486
	2/0	143.4	0.2223	13.51	0.532
	3/0	172.8	0.2679	14.83	0.584
	4/0	208.8	0.3237	16.31	0.642
	THHN, THWN, THWN-2	250	256.1	0.3970	18.06
300		297.3	0.4608	19.46	0.766
350		338.2	0.5242	20.75	0.817
400		378.3	0.5863	21.95	0.864
500		456.3	0.7073	24.10	0.949
600		559.7	0.8676	26.70	1.051
700		637.9	0.9887	28.50	1.122
750		677.2	1.0496	29.36	1.156
800		715.2	1.1085	30.18	1.188
900		794.3	1.2311	31.80	1.252
1000		869.5	1.3478	33.27	1.310

Tabla 5 Dimensiones de conductores aislados y de cables de artefactos

Tabla 5 (Continuación)

Tipo	Calibre (AWC o kcmil)	Área aproximada		Diámetro aproximado	
		mm ²	pulg. ²	mm	pulg.
Tipos: RHH*, RHW*, RHW-2*, THHN, THHW, THW, THW-2, TFN, TFFN, THWN, THWN-2, XF, XFF					
THHN, THWN, THWN-2	14	6.258	0.0097	2.819	0.111
	12	8.581	0.0133	3.302	0.130
	10	13.61	0.0211	4.166	0.164
	8	23.61	0.0366	5.486	0.216
	6	32.71	0.0507	6.452	0.254
	4	53.16	0.0824	8.230	0.324
	3	62.77	0.0973	8.941	0.352
	2	74.71	0.1158	9.754	0.384
	1	100.8	0.1562	11.33	0.446
	1/0	119.7	0.1855	12.34	0.486
	2/0	143.4	0.2223	13.51	0.532
	3/0	172.8	0.2679	14.83	0.584
	4/0	208.8	0.3237	16.31	0.642
	THHN, THWN, THWN-2	250	256.1	0.3970	18.06
300		297.3	0.4608	19.46	0.766
350		338.2	0.5242	20.75	0.817
400		378.3	0.5863	21.95	0.864
500		456.3	0.7073	24.10	0.949
600		559.7	0.8676	26.70	1.051
700		637.9	0.9887	28.50	1.122
750		677.2	1.0496	29.36	1.156
800		715.2	1.1085	30.18	1.188
900		794.3	1.2311	31.80	1.252
1000		869.5	1.3478	33.27	1.310

210.19 Conductores – Ampacidad mínima y calibre mínimo.

(A) Circuitos ramales de no más de 600 volts.

Nota informativa nro. 1: Ver sección 310.15 sobre ampacidad de los conductores.

Nota informativa nro. 2: Ver la Parte II del Artículo 430 sobre capacidad nominal mínima de los conductores de circuitos ramales de motores.

Nota informativa nro. 3: Ver sección 310.15(A)(3) sobre limitación de temperatura de los conductores.

Nota informativa nro. 4: Los conductores para circuitos ramales, según se define en el Artículo 100, dimensionados para evitar una caída de tensión que exceda del 3% en la salida más lejana de las cargas de energía, calefacción e iluminación o cualquier combinación de dichas cargas, y en los que la caída máxima total de tensión tanto en alimentadores como en circuitos ramales hasta la salida más lejana no exceda del 5%, ofrecerán una eficiencia de funcionamiento razonable. Ver nota informativa nro. 2 de la sección 215.2(A)(1)(b) sobre caída de tensión en los conductores del alimentador.

Tabla 9 Resistencia y reactancia en corriente alterna para los cables para 600 volts, 3 fases a 60 Hz y 75°C (167°F) — Tres conductores individuales en un conducto

Calibre (AWG o kcmil)	Ohms al neutro por kilómetro														Calibre (AWG o kcmil)
	Ohms al neutro por 1000 pies														
	X _L (Reactancia) para todos los alambres		Resistencia en corriente alterna para alambres de cobre sin recubrir			Resistencia en corriente alterna para alambres de aluminio			Z eficaz a 0.85 PF para alambres de cobre sin recubrir			Z eficaz a 0.85 PF para alambres de aluminio			
Conductos de PVC o Aluminio	Conducto de acero	Conducto de PVC	Conducto de aluminio	Conducto de acero	Conducto de PVC	Conducto de aluminio	Conducto de acero	Conducto de PVC	Conducto de aluminio	Conducto de acero	Conducto de PVC	Conducto de aluminio	Conducto de acero		
14	0.190 0.058	0.240 0.073	10.2 3.1	10.2 3.1	10.2 3.1	—	—	—	8.9 2.7	8.9 2.7	8.9 2.7	—	—	—	14
12	0.177 0.054	0.223 0.068	6.6 2.0	6.6 2.0	6.6 2.0	10.5 3.2	10.5 3.2	10.5 3.2	5.6 1.7	5.6 1.7	5.6 1.7	9.2 2.8	9.2 2.8	9.2 2.8	12
10	0.164 0.050	0.207 0.063	3.9 1.2	3.9 1.2	3.9 1.2	6.6 2.0	6.6 2.0	6.6 2.0	3.6 1.1	3.6 1.1	3.6 1.1	5.9 1.8	5.9 1.8	5.9 1.8	10
8	0.171 0.052	0.213 0.065	2.56 0.78	2.56 0.78	2.56 0.78	4.3 1.3	4.3 1.3	4.3 1.3	2.26 0.69	2.26 0.69	2.30 0.70	3.6 1.1	3.6 1.1	3.6 1.1	8
6	0.167 0.051	0.210 0.064	1.61 0.49	1.61 0.49	1.61 0.49	2.66 0.81	2.66 0.81	2.66 0.81	1.44 0.44	1.48 0.45	1.48 0.45	2.33 0.71	2.36 0.72	2.36 0.72	6
4	0.157 0.048	0.197 0.060	1.02 0.31	1.02 0.31	1.02 0.31	1.67 0.51	1.67 0.51	1.67 0.51	0.95 0.29	0.95 0.29	0.98 0.30	1.51 0.46	1.51 0.46	1.51 0.46	4
3	0.154 0.047	0.194 0.059	0.82 0.25	0.82 0.25	0.82 0.25	1.31 0.40	1.35 0.41	1.31 0.40	0.75 0.23	0.79 0.24	0.79 0.24	1.21 0.37	1.21 0.37	1.21 0.37	3
2	0.148 0.045	0.187 0.057	0.62 0.19	0.66 0.20	0.66 0.20	1.05 0.32	1.05 0.32	1.05 0.32	0.62 0.19	0.62 0.19	0.66 0.20	0.98 0.30	0.98 0.30	0.98 0.30	2
1	0.151 0.046	0.187 0.057	0.49 0.15	0.52 0.16	0.52 0.16	0.82 0.25	0.85 0.26	0.82 0.25	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	0.79 0.24	0.79 0.24	0.82 0.25	1
1/0	0.144 0.044	0.180 0.055	0.39 0.12	0.43 0.13	0.39 0.12	0.66 0.20	0.69 0.21	0.66 0.20	0.43 0.13	0.43 0.13	0.43 0.13	0.62 0.19	0.66 0.20	0.66 0.20	1/0
2/0	0.141 0.043	0.177 0.054	0.33 0.10	0.33 0.10	0.33 0.10	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	0.36 0.11	0.36 0.11	0.36 0.11	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	2/0
3/0	0.138 0.042	0.171 0.052	0.253 0.077	0.269 0.082	0.259 0.079	0.43 0.13	0.43 0.13	0.43 0.13	0.289 0.088	0.302 0.092	0.308 0.094	0.43 0.13	0.43 0.13	0.46 0.14	3/0
4/0	0.135 0.041	0.167 0.051	0.203 0.062	0.220 0.067	0.207 0.063	0.33 0.10	0.36 0.11	0.33 0.10	0.243 0.074	0.256 0.078	0.262 0.080	0.36 0.11	0.36 0.11	0.36 0.11	4/0
250	0.135 0.041	0.171 0.052	0.171 0.052	0.187 0.057	0.177 0.054	0.279 0.085	0.295 0.090	0.282 0.086	0.217 0.066	0.230 0.070	0.240 0.073	0.308 0.094	0.322 0.098	0.33 0.10	250
300	0.135 0.041	0.167 0.051	0.144 0.044	0.161 0.049	0.148 0.045	0.233 0.071	0.249 0.076	0.236 0.072	0.194 0.059	0.207 0.063	0.213 0.065	0.269 0.082	0.282 0.086	0.289 0.088	300
350	0.131 0.040	0.164 0.050	0.125 0.038	0.141 0.043	0.128 0.039	0.200 0.061	0.217 0.066	0.207 0.063	0.174 0.053	0.190 0.058	0.197 0.060	0.240 0.073	0.253 0.077	0.262 0.080	350

$$Z_e = R \times PF + X_L \sin[\arccos(PF)].$$

215.2 Valor nominal y calibres mínimos.

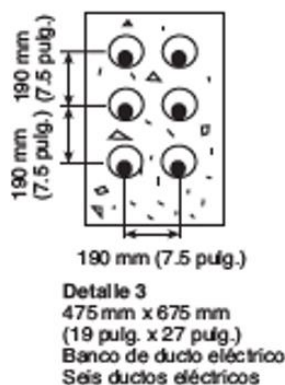
(A) Alimentadores a no más de 600 volts.

(1) **Generalidades.** Los conductores de los alimentadores deben tener una ampacidad no menor que la requerida para alimentar la carga, según lo calculado en las Partes III, IV y V del Artículo 220. Los conductores deben estar dimensionados para transportar no menos que el valor más alto de los especificados en 215.2(A)(1)(a) o (b).

(a) Donde un alimentador abastece cargas continuas o cualquier combinación de cargas continuas y no continuas, el calibre mínimo del conductor del alimentador debe tener una ampacidad permitida no menor que la carga no continua más el 125% de la carga continua.

Tabla 450.3(A) Valor nominal o ajuste máximo de la protección contra sobrecorriente para transformadores de más de 1000 volts (como porcentaje de la corriente nominal del transformador)

Limitaciones del lugar	Impedancia nominal del transformador	Protección secundaria (ver Nota 2.)				
		Protección primaria de más de 1000 volts		Más de 1000 volts		1000 volts o menos
		Interruptor automático (ver Nota 4.)	Valor nominal del fusible	Interruptor automático (ver Nota 4.)	Valor nominal del fusible	Valor nominal del Interruptor automático o del fusible
Cualquier lugar	No más del 6%	600% (ver Nota 1.)	300% (ver Nota 1.)	300% (ver Nota 1.)	250% (ver Nota 1.)	125% (ver Nota 1.)
	Más del 6% y no más del 10%	400%	300% (ver Nota 1.)	250% (ver Nota 1.)	225% (ver Nota 1.)	125% (ver Nota 1.)
Lugares supervisados únicamente (ver Nota 3.)	Cualquiera	300% (ver Nota 1.)	250% (ver Nota 1.)	No requerido	No requerido	No requerido
	No más del 6%	600%	300%	300% (ver Nota 5.)	250% (ver Nota 5.)	250% (ver Nota 5.)
	Más del 6% y no más del 10%	400%	300%	250% (ver Nota 5.)	225% (ver Nota 5.)	250% (ver Nota 5.)



Anexo 4. Reporte de rendimiento de modelo similar de buses Yutong en Bogotá, Colombia



De acuerdo a la operación de la flota se tienen los siguientes datos:

- Promedio de la flota: 1,15 Km/kw - 0.87 kw/km

