

UNIVERSIDAD CENTRAL



ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD DE TESIS PARA
OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNIDADES
ELÉCTRICAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE LA RUTA DE GRUPO TUASA
SAN JOSÉ ALAJUELA.**

ESTUDIANTE:

DAGO STEVEN BARRANTES FERNÁNDEZ

SAN JOSÉ, COSTA RICA

2025

DEDICATORIA

A mis padres Dagoberto y Cristina por siempre permanecer a mi lado, y por mantenerse siempre dándome ejemplo para mantener el trabajo, la fe y la perseverancia, a ellos dedico este logro porque el fruto de mis esfuerzos es recompensa para mis padres.

A mis hermanos Alonso y Elizabeth por motivarme a salir adelante y generar un cambio en mi vida, por creer en mí y servirme de ayuda en aspectos, emocionales, sociales y económicos.

A mis compañeros de clase, que siempre abrieron las puertas de sus hogares y tuvieron la paciencia para trabajar en conjunto, para mantenerse constante en largas jornadas, para ayudarme y guiarme en este camino de conocimiento.

A la Universidad Central, por servir de eje principal para que pueda cumplir mis sueños y metas, le dedico a esta institución y a sus profesores la satisfacción de una labor que no tiene precio, una labor que permanece plasmada en mi mente y en mi corazón.

Dago Steven Barrantes Fernández

AGRADECIMIENTO

A Dios en primer lugar por darme la salud y brindarme las fuerzas de alcanzar una meta personal de gran valor, a Él las gracias por darme la capacidad y la sabiduría para ir en busca de una mejora continua, Infinitas gracias a Dios todo poderoso por darme la oportunidad y abrirme el camino para adquirir estos conocimientos.

A la familia Barrantes Fernández, por estar siempre en disposición para sobreponerse antes las dificultades y darme el apoyo en las largas horas de arduo trabajo, a ellos las gracias por permitirme tener el tiempo necesario para dedicar toda mi energía y esfuerzo.

A la familia Picado Salas, por el apoyo incondicional que tanto me han brindado durante todos estos años, a ellos las gracias por formar parte fundamental de mi desarrollo como persona y como profesional.

Dago Steven Barrantes Fernández

EPÍGRAFE

No importa cuántos obstáculos se interpongan en tu camino, siempre hay una forma de superarlos. Nunca te rindas.

Arnold Schwarzenegger

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad de implementar unidades eléctricas en la ruta de transporte público operada por Grupo TUASA entre San José y Alajuela, durante el primer semestre del 2025. La iniciativa responde al interés creciente por modernizar el transporte público mediante tecnologías sostenibles que reduzcan el impacto ambiental y optimicen los costos operativos.

La investigación aplica un enfoque mixto. A través de encuestas se obtienen datos cuantitativos sobre variables como consumo energético, reducción de emisiones y aceptación del cambio por parte de los usuarios. Paralelamente, se aplican entrevistas semiestructuradas para conocer las percepciones de usuarios y actores clave del sistema de transporte.

Entre los principales hallazgos se identifica un alto nivel de interés hacia la movilidad eléctrica, así como beneficios potenciales en eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental. No obstante, también se evidencian retos como la necesidad de infraestructura de carga y la inversión inicial. Este estudio busca servir como insumo técnico para la toma de decisiones en la transición hacia un transporte público más limpio e innovador.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
EPÍGRAFE	iv
RESUMEN	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	3
ANTECEDENTES.....	4
OBJETIVOS.....	16
<i>Objetivo general</i>	<i>16</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>17</i>
JUSTIFICACIÓN	17
ALCANCES Y PROYECCIONES.....	19
LIMITACIONES.....	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	23

Marco situacional	24
<i>Reseña histórica de Grupo TUASA</i>	24
<i>Transporte público</i>	32
<i>Movilidad eléctrica</i>	36
<i>Vehículo eléctrico</i>	42
<i>Funcionamiento del vehículo eléctrico</i>	45
<i>Infraestructura de recarga</i>	48
Marco jurídico	52
<i>Ley N.º 9518: Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico en Costa Rica</i>	53
<i>Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030</i>	54
<i>Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050</i>	57
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	57
Enfoque de la investigación	58
<i>Enfoque cuantitativo</i>	59
<i>Enfoque cualitativo</i>	60
<i>Enfoque mixto</i>	61
Método de la investigación	62
<i>Método deductivo</i>	62
Sujeto y fuentes de información	63

<i>Sujetos de información</i>	63
<i>Tipo de muestra</i>	64
<i>Fuentes de información</i>	65
Variables o Unidades de Análisis	66
Instrumentos y técnicas de investigación	70
CAPÍTULO IV. RECOLECCIÓN DE DATOS	72
Análisis del entorno.....	74
<i>Análisis descriptivo de la entrevista aplicada a los autobuseros del transporte público de la ruta San José - Alajuela (Grupo TUASA)</i>	74
<i>Análisis descriptivo de la encuesta aplicada a los usuarios del transporte público de la ruta San José - Alajuela (Grupo TUASA)</i>	89
Datos relevantes de la ruta en estudio	106
<i>Descripción de las unidades actuales de combustión interna</i>	109
<i>Descripción de las unidades de transporte eléctrico propuestas</i>	110
<i>Estación de recarga nocturna</i>	111
Inversión Inicial	125
Costos operativos	128
<i>Costos fijos</i>	128
<i>Costos energéticos mensuales</i>	129
<i>Proyección de ingresos operativos semestrales</i>	131

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
Conclusiones	144
<i>Recomendaciones.....</i>	<i>146</i>
BIBLIOGRAFÍA	155
Referencia citada	153
Referencia consultada	159
ANEXOS.....	152

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Terminal de buses Grupo TUASA San José Centro	26
Ilustración 2 Pirámide de la movilidad sostenible	28
Ilustración 3 Contaminación del aire y la salud.....	31
Ilustración 4 Daños en la Salud debido a la contaminación del aire	36
Ilustración 5 Comparación constructiva del chasis Autobús Eléctrico vs Diésel....	41
Ilustración 6 Distribución de los componentes del Autobús Eléctrico.....	46
Ilustración 7 Módulos y paquetes de baterías	48
Ilustración 8 Esquema de estación de carga pública.....	50
Ilustración 9 Instalación de toma de carga en una localización domiciliaria.....	51
Ilustración 10 Estaciones de servicio eléctrico	52
Ilustración 11 Recorrido de autobuses ruta 200	107
Ilustración 12 Altimetría del terreno	108
Ilustración 13 Diagrama unifilar	113
Ilustración 14 Coeficiente de consumo de combustible (cccy).....	116
Ilustración 15 Coeficiente de ajuste de acuerdo con la superficie de rodamiento (ccsr).....	116
Ilustración 16 Coeficiente de ajuste por reconocimiento de kilometraje improductivo (cki).....	117
Ilustración 17 Cantidad de litros de aceite de motor (ccamy)	117

Ilustración 18 Frecuencia del cambio de aceite de motor (fcammy)	118
Ilustración 19 Cantidad de litros de aceite de caja de cambios (ccacxy)	119
Ilustración 20 Frecuencia del cambio de aceite de caja de cambios (fcacxy)	119
Ilustración 21 Conjunto de filtros de combustible por autobús (ccfcy)	120
Ilustración 22 Frecuencia del cambio de conjunto de filtros de combustible (fcfcy)	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipo muestreo no probabilístico.....	64
Tabla 2 Definición, operacionalización e instrumentalización de las variables de la investigación	67
Tabla 3 Implementación de buses eléctricos.....	75
Tabla 4 Beneficios de los buses eléctricos	76
Tabla 5 Retos o dificultades al incorporar unidades eléctricas.....	77
Tabla 6 Infraestructura	78
Tabla 7 Capacitación o información por parte de la empresa	79
Tabla 8 Rendimiento de los buses eléctricos.....	80
Tabla 9 Mantenimiento de los buses eléctricos	81
Tabla 10 Reacción de los usuarios.....	82
Tabla 11 Implementar buses eléctricos en la flota actual	83
Tabla 12 Incorporación de tecnología más sostenible	84
Tabla 13 Impacto ambiental	85
Tabla 14 Cambios ambientales	86
Tabla 15 Buses eléctricos a la construcción de un sistema de transporte	87
Tabla 16 Beneficios de los autobuses eléctricos	104
Tabla 17 Datos mes de enero 2025 ruta 200.....	106
Tabla 18 Especificaciones del motor	110

Tabla 19 Características de autobús eléctrico Yutong C13E	111
Tabla 20 Características del cargador Yutong SZ-160.....	112
Tabla 21 Materiales requeridos para instalación eléctrica	114
Tabla 22 Conceptos de mantenimiento para la ruta 200.....	115
Tabla 23 Costo de mantenimiento por kilómetro según su tiempo de circulación	121
Tabla 24 Consumo energético por kilómetro para unidades eléctricas y diésel euro4.....	121
Tabla 25 Costo de adquisición de unidades	122
Tabla 26 Costo de los materiales para realizar la infraestructura de carga	123
Tabla 27 Impacto en el ambiente.....	124
Tabla 28 Inversión inicial autobuses eléctricos	126
Tabla 29 Inversión inicial autobuses diésel.....	127
Tabla 30 Costos fijos	129
Tabla 31 Consumo de energía	130
Tabla 32 Costos de mantenimiento	131
Tabla 33 Datos de la ruta para Tarifa.....	132
Tabla 34 Comparación y detalle del costo total de inversión	133
Tabla 35 Estimación de ingresos totales durante 15 años de gestión.....	133

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Rango de edad	89
Gráfico 2 Frecuencia de utilización del transporte público.....	91
Gráfico 3 Importancia del medio de transporte	92
Gráfico 4 Satisfacción del servicio.....	93
Gráfico 5 Familiarización del concepto	94
Gráfico 6 Implementación de unidades eléctricas	95
Gráfico 7 Impacto ambiental	96
Gráfico 8 Transporte más limpio y eficiente.....	97
Gráfico 9 Reducción de la contaminación	98
Gráfico 10 Niveles elevados de ruido	99
Gráfico 11 Niveles de emisiones contaminantes	100
Gráfico 12 Reducción del ruido	101
Gráfico 13 Gestión eficiente una flota de autobuses eléctricos	102
Gráfico 14 Gestión eficiente una flota de autobuses eléctricos	103
Gráfico 15 Cronograma de carreras con recesos integrados	107

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de esta investigación pretende desarrollar planes que permitan promover iniciativas de mejoramiento en temas de transporte público en el país. En los últimos tiempos, uno de los problemas mayormente mencionados en el campo nacional es la insostenible producción de gases contaminantes en las áreas urbanas.

Gran parte de este aspecto negativo es propiciado por las unidades de las líneas de transporte público. En ese sentido, millones de toneladas de CO₂ son expulsadas por los automotores, los cuales, con una buena intención, permiten el flujo de transporte de la población que comprende la gran fuerza laboral de Costa Rica.

Bajo esta condición, se requiere de alternativas para la disminución o eliminación de estos agentes contaminantes. Por ello, se desarrolla la propuesta del Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050, el cual plantea una investigación enfocada en el reemplazo de las flotillas de autobuses de combustión interna a unidades totalmente eléctricas.

El desarrollo de esta investigación surge a partir de la necesidad de analizar la viabilidad y rentabilidad de la implementación de unidades de movilidad eléctrica en el transporte público, específicamente en la ruta de autobuses del Grupo TUASA, que cubre el recorrido entre San José y Alajuela. Actualmente, solo existen referencias limitadas en forma de planes piloto, los cuales brindan una base de datos inicial, pero no permiten determinar, con certeza, la factibilidad ni los beneficios reales para usuarios e involucrados.

El problema se origina en la falta de estudios profundos que consideren criterios técnicos, operativos y administrativos para la transición hacia una infraestructura más sostenible en el sector del transporte público. A pesar de que, en el ámbito industrial, particularmente en el sector alimenticio, ya se emplean unidades eléctricas para transporte y almacenamiento con montacargas, y de que existe un creciente número de usuarios que optan por la movilidad eléctrica a nivel personal, estos casos no ofrecen el nivel de profundidad requerido para evaluar el costo-beneficio desde una perspectiva gerencial en el transporte masivo de pasajeros.

Ante esta situación, resulta imprescindible desarrollar una investigación que permita generar conocimiento relevante para la toma de decisiones estratégicas en el sector público y privado. Por lo tanto, se proporcionan datos claves para valorar la viabilidad y el impacto económico de proyectos de movilidad eléctrica en el transporte colectivo.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es viable la implementación de autobuses eléctricos en la ruta de transporte público operada por Grupo TUASA entre San José y Alajuela, considerando los factores técnicos, económicos, operativos y ambientales?

Esta interrogante presenta una infinidad de aristas que deben ser minuciosamente estudiadas y comprendidas. No obstante, en términos generales, la implementación de unidades eléctricas en la ruta San José - Alajuela operada por Grupo TUASA es técnica, económica y ambientalmente viable, y permitiría una

reducción significativa en costos operativos y emisiones contaminantes en comparación con el uso de autobuses diésel.

Es inevitable la adopción de los avances tecnológicos en todos los ámbitos de una nación, y más una que se considera de principios y políticas de conservación de la naturaleza y su entorno.

La sola consideración de no expulsar emisiones contaminantes responde sin justificantes a esta interrogante. Por ende, sin lugar a dudas, Costa Rica debe unirse a una campaña de no utilización de automotores de combustión interna. En ese sentido, es de suma importancia iniciar por sus principales entes como los encargados de regir las movilizaciones en las carreteras nacionales.

Este cambio en la cultura de la movilidad eléctrica se debe hacer de manera profesional a partir de estudios, investigaciones e indicadores que permitan una correcta evaluación de los datos y direccionar, de manera inteligente, los fondos y las decisiones para una operación correcta, perdurable y eficiente.

ANTECEDENTES

En el estudio de Figueroa (2018) denominado: “Caracterización de la demanda por vehículos eléctricos en Santiago, Chile”, realizado en la Universidad de Chile, para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, se plantea como objetivo general: caracterizar la demanda por vehículos eléctricos para el caso de Chile.

La metodología empleada es de tipo cualitativo en donde se implementó una revisión bibliográfica y un estudio de grupo focal, el cual consistió en llevar a seis u

ocho personas de cada grupo objetivo a un café céntrico de la ciudad, ofrecerles una merienda y, entre tanto, hacerles preguntas para indagar sobre su percepción acerca de los vehículos eléctricos. Dicho instrumento fue aplicado a un total de 19 personas.

Los resultados evidencian que la percepción de beneficios y barreras hacia los vehículos eléctricos varía según el grado de información y experiencia de los participantes. Los grupos más informados, como los ganadores y postulantes, identificaron más ventajas relacionadas con el uso real del vehículo, mientras que los externos e indiferentes compartían una visión más limitada. Se destaca que la experiencia directa con el vehículo eléctrico mejora la percepción general, reduce temores iniciales y evidencia una rápida adaptación. Además, los incentivos económicos ofrecidos por el plan fueron claves para motivar la adopción al hacer más accesible y menos riesgosa esta tecnología (Figueroa, 2018).

La información del estudio es clave en la implementación de buses eléctricos en la ruta TUASA San José - Alajuela, ya que revela cómo la experiencia y el conocimiento influyen en la percepción de beneficios y barreras. Aspectos como costo, autonomía e infraestructura de carga deben ser considerados, así como la importancia de incentivos económicos y pruebas piloto que faciliten la aceptación del cambio por parte de conductores y usuarios.

Por otra parte, un antecedente relevante es el estudio realizado por Alvear (2019) titulado “Diseño del sistema eléctrico en baja tensión para estaciones de carga de autobuses eléctricos”, presentado en la Universidad de Cuenca como requisito para optar por el título de Ingeniero Eléctrico. El objetivo principal de esta

investigación fue desarrollar el diseño de un sistema eléctrico en baja tensión destinado a alimentar un centro de carga para autobuses eléctricos.

La metodología adoptada fue de tipo descriptivo y estuvo orientada específicamente al diseño de la instalación eléctrica necesaria para atender una flota promedio de 68 autobuses eléctricos. El trabajo incluye un análisis detallado de las especificaciones técnicas, así como los cálculos eléctricos indispensables para su implementación.

El estudio resalta la importancia de promover el uso de autobuses completamente eléctricos como una alternativa permanente de transporte público en Ecuador, particularmente, en la ciudad de Cuenca. Este tipo de vehículos ofrece beneficios significativos, tanto para el medio ambiente, como para la economía nacional al no emitir gases contaminantes ni producir contaminación acústica, lo cual mejora la calidad del aire y la salud pública. Además, su implementación contribuiría a reducir la dependencia del diésel importado y subsidiado, lo cual representa un ahorro económico considerable para el país.

No obstante, Alvear (2019) subraya que la adopción efectiva de esta tecnología requiere de una infraestructura adecuada y capaz de suministrar energía eléctrica de manera confiable. Dicha infraestructura debe ser ubicada en zonas estratégicas que permitan el acceso y la recarga eficiente de las unidades durante el tiempo requerido.

La información anterior resulta fundamental para el análisis de la viabilidad de la implementación de unidades eléctricas en la ruta San José – Alajuela, pues ofrece una sólida base técnica enfocada en el diseño de sistemas eléctricos para

estaciones de carga de autobuses eléctricos. Asimismo, destaca beneficios ambientales y económicos relevantes, como disminución de emisiones contaminantes y ahorro en el consumo de combustibles fósiles. Dichos aspectos fortalecen la pertinencia y sostenibilidad del proyecto dentro del contexto costarricense.

En el estudio realizado por Meza, et al. (2022) titulado: “Evaluación de la factibilidad económica para cambiar la actual flota de autobuses convencionales por autobuses eléctricos en el Corredor Rojo en la Ciudad Metropolitana de Lima mediante la técnica del Total Cost of Ownership en el periodo 2020-2030”, elaborado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas para optar al título de ingeniería, se plantea como objetivo principal analizar el impacto económico de la flota actual de autobuses en comparación con una nueva flota de autobuses eléctricos que operen en la ruta de Servicio 201, que conecta las estaciones La Marina y Ceres.

La metodología utilizada en dicha investigación es multireferencial y multidimensional, ya que aborda, tanto aspectos cualitativos, como cuantitativos relacionados con la economía, operación y administración, además de cuantificar, en términos económicos, el impacto ambiental de cada tipo de autobús. Se trata de un estudio documental y de campo exploratorio, en el cual se recopilaban datos técnicos, operativos y administrativos de ambos tipos de vehículos.

Para el análisis económico, se aplicó la metodología Total Cost of Ownership para calcular el costo por kilómetro de propiedad. Asimismo, se emplearon herramientas comparativas como Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno

(TIR) y software @Risk con el fin de integrar proyecciones temporales y obtener una evaluación financiera más precisa.

Como resultado, aunque el costo inicial de adquisición de los autobuses eléctricos es mayor aproximadamente 1.9 veces al de los autobuses diésel, a largo plazo, los beneficios económicos se reflejan, de manera principal, en el menor costo de mantenimiento, el cual puede representar hasta seis veces inferior en los autobuses eléctricos gracias a la simplicidad de sus motores y a la reducción de piezas susceptibles a desgaste.

No obstante, el alto costo inicial implica una inversión significativa que requiere financiamiento, el cual para los e-buses fue casi cuatro veces mayor en comparación con el requerido para los buses diésel. Además, la estructura del financiamiento presenta diferencias notables, pues, en los autobuses eléctricos, se financian varios componentes con porcentajes específicos, mientras que, en los autobuses diésel, solo se financia el chasis. Estos factores financieros y técnicos resultan cruciales para determinar la viabilidad económica y operativa del cambio hacia unidades eléctricas en el transporte público (Meza, et al., 2022).

La información obtenida sobre los costos de adquisición, mantenimiento y financiamiento de los autobuses eléctricos es fundamental para un nuevo estudio de factibilidad en la ruta San José - Alajuela, ya que es necesario comprender que el costo inicial de los e-buses es mucho mayor que el de los buses diésel, pero que cuentan con un mantenimiento mucho más económico, lo cual permite realizar una evaluación integral del impacto económico, tanto a corto, como a largo plazo.

Por lo anterior, dichos datos son esenciales para respaldar la toma de decisiones, asegurar la sostenibilidad económica del proyecto y mejorar la planificación financiera y operativa en el contexto costarricense.

Bejarano (2020), en su investigación denominada: “Estudio de prefactibilidad para la instalación de centros de recarga para vehículos eléctricos en el Campus Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica”, manifiesta que Costa Rica ha reafirmado su compromiso con el medio ambiente a través de su Plan de Descarbonización 2018-2050. Según estudios realizados, más del 40 % de las emisiones de CO₂ provienen de los vehículos particulares que utilizan combustibles fósiles.

Por esta razón, el Estado impulsa la transición hacia vehículos de cero emisiones. Como parte de este compromiso, para el año 2050, se ha establecido la meta de alcanzar una flota de vehículos eléctricos que represente más del 60 % del total de unidades en el país.

De esta manera, se evidenció, como pronóstico, un incremento en la demanda máxima de carga de los transformadores cuando los automóviles eran cargados en forma rápida en comparación con la carga lenta. Por consiguiente, se concluyó que, en el caso de la carga rápida, la demanda máxima aumentó en un 47 %, mientras que, para la carga lenta, el incremento fue del 18,11 % (Bejarano., 2020).

Considerando lo anterior, dicha investigación se centró en el análisis de la capacidad de los transformadores requeridos a mediano plazo, considerando la demanda energética de los estudiantes y profesores del TEC.

Además, se hizo referencia a las disposiciones del artículo 625 del *Sistema de carga de vehículos eléctricos* basado en el Código Eléctrico Nacional. Dicho artículo regula los conductores y equipos eléctricos externos a los vehículos eléctricos, los cuales permiten su conexión a una fuente de alimentación mediante medios conductivos e inductivos, así como la instalación de los equipos y dispositivos asociados a la carga de estos vehículos (NFPA, 2014). Para llevar a cabo el diseño, era fundamental definir un modelo de vehículo eléctrico disponible en el país. Con base en sus características, el estudio asumirá que los 27 vehículos analizados corresponden a ese mismo modelo (Bejarano, 2020).

Cuando estos vehículos son cargados en centros de recarga rápida, el consumo de energía ronda los 50 kW por cada unidad conectada. Esta potencia debe estar disponible en la red en el momento de la recarga para evitar su saturación. Además, los centros de recarga rápida permiten cargar los vehículos únicamente hasta un 80 % de su capacidad. Cabe destacar que el uso continuo de este tipo de recarga puede afectar la eficiencia de la batería y reducir su vida útil (Bejarano, 2020).

Seguidamente, se muestra la investigación de Netzer (2022) titulada: “Estudio de prefactibilidad técnico financiero para la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos en el Tecnológico de Costa Rica, Campus Cartago” para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

Dicho proyecto estuvo orientado a realizar estudios y análisis de ciclos de vida útil de los vehículos eléctricos para poder obtener factores claves con el

propósito de realizar una comparación real con los vehículos de combustión. Una de las principales limitaciones en este proyecto fue que, en Costa Rica, no se ha generado ningún tipo de investigación previa de la estructura de costos de la implementación de vehículos eléctricos en el sector de transporte (Netzer., 2022).

Consecuentemente, es necesario manifestar que la tarifa que se encuentra en la actualidad para la red de carga rápida es de ₡182,72 por kWh, lo cual, en dólares, es aproximadamente de \$0,24 con el tipo de cambio promedio del mes de agosto 2022 que se visualiza en el apéndice D. Dicho un monto que promueve y facilita el uso de vehículos eléctricos, además de que la Red de carga rápida cuenta con 47 centros de carga en todo el país. El desarrollo de la infraestructura de carga ha ganado una atención significativa en los países desarrollados y en desarrollo, ya que una infraestructura de carga inadecuada puede afectar la promoción de vehículos eléctricos en el mercado (Netzer., 2022).

Es necesario aclarar que se seleccionó la infraestructura requerida para los vehículos eléctricos con las especificaciones técnicas requeridas de los centros de carga disponibles en Costa Rica. Además, se elaboraron las estructuras de costos correspondientes de las fases de adquisición, operación, mantenimiento y disposición final de los vehículos. Por tanto, se determinó la rentabilidad económica del plan de sustitución con el propósito de evitar el uso excesivo de los centros de carga rápida, ya que puede dañar, a largo plazo, el funcionamiento óptimo de la batería. Por consiguiente, se debe procurar realizar la recarga de manera lenta o semirrápida en el transcurso de la noche (Netzer, 2022).

Esta investigación está profundamente orientada a un análisis de viabilidad financiera. Por ello, es importante colocarla como antecedente y determinar las similitudes con el proyecto en desarrollo.

Seguidamente, se presenta el estudio de Díaz, *et al.* (2023) denominado: “Análisis de perspectivas y políticas públicas enfocadas al transporte público eléctrico modalidad autobús en Costa Rica (2018-2022)”, cuya publicación se realizó en la Revista Infraestructura Vial / UCR. La finalidad de esta indagación se basó específicamente en estudiar el impacto en la salud de la ciudadanía. La metodología empleada fue de tipo técnico por medio de una revisión documental como una herramienta para el estudio de políticas públicas.

Dichas políticas están enfocadas en el transporte eléctrico modalidad autobús. Al respecto, se menciona que el sector de transporte público tiene un impacto negativo en la salud de la ciudadanía, ya que su uso corresponde al 66% del consumo de combustibles fósiles y es responsable del 54 % de las emisiones de carbono en el país.

Este también hace mención a que en el capítulo III de la Ley N° 9518 habla sobre los incentivos de carácter económico, relativo a los incentivos fiscales, de crédito y otras facilidades, se plantean exoneraciones por concepto de impuesto general de ventas y el impuesto sobre valor aduanero de acuerdo con el costo del vehículo (Díaz, 2023).

En el 2035, el 30 % de la flota de transporte público será cero emisiones y el tren eléctrico de pasajeros operará 100 % eléctrico. En el 2050, el sistema de transporte público (buses, taxis, tren eléctrico de pasajeros) operará en forma

integrada y sustituirá al automóvil particular como la primera opción de movilidad para la población en la GAM (Díaz, 2023).

Entre las principales limitaciones, es posible identificar la incierta rentabilidad que les permita a los operadores de autobuses el recuperar los costos de inversiones asociados con el reemplazo de las flotas eléctricas. Manejar el transporte público es complejo, pues el CTP y MOPT no tienen las capacidades técnico-administrativas para poder manejar todo el sistema de movilidad, tanto en infraestructura, como en la construcción de rutas. En la búsqueda de nuevas tecnologías, los operadores no pueden asumir los altos costos de obtener dichas flotas, ya que las nuevas tecnologías son costosas. De esta forma, se propone un financiamiento donde un actor externo, ya sea privado o público, se encargue de adquirir las unidades y las venda o alquile a los operadores (Díaz, 2023).

Se concluye que, para que se logre una implementación del transporte público eléctrico, es necesario asignarlo como prioridad en dicha agenda pública. Asimismo, para que esto se cumpla, es necesaria una reestructuración y modernización sistemática que incentive nuevos modelos de negocios, protección y defensa de los derechos de los usuarios, planificación y operativización de los sectores, reducción de los costos tarifarios, cobro electrónico y mejoramiento del estado de las rutas (Díaz, 2023).

Según dicho estudio, la propuesta de transición a esta tecnología no es una decisión de la noche a la mañana, pues existen múltiples aristas que deben ser afrontadas desde la parte política hasta la empresarial. Por ello, es importante hacer mención de este antecedente.

Por su parte, Salas (2023), en el Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial, realizó una investigación titulada: “Estudio de prefactibilidad técnico-financiero basado en el análisis del costo del ciclo de vida útil para la implementación de un camión eléctrico de carga pesada en Boston Scientific de Costa Rica S. R. L., sitio Heredia”. En dicho estudio, se planteó como objetivo general: Desarrollar un estudio de prefactibilidad técnico-financiero actual para la implementación de un camión eléctrico de carga pesada por medio de un análisis comparativo del costo del ciclo de vida útil en Boston Scientific de Costa Rica S. R. L. sitio Heredia de acuerdo con el Plan Nacional de Descarbonización y el Plan Estratégico Nacional 2050.

La metodología utilizada en este estudio fue de tipo exploratorio, pues buscaba evaluar la prefactibilidad técnico-financiera ateniendo con el costo del ciclo de vida útil para la ejecución de un camión eléctrico de carga pesada en Boston Scientific. La recolección de la información se realizó por medio de entrevistas, reuniones y mensajería con personas a lo interno de la organización y otras externas expendedoras de este tipo de camiones, es decir, se estudió el mercado nacional e internacional de camiones eléctricos de carga pesada.

Según se indica, se seleccionó un tablero con espacios disponibles con el amperaje adecuado, muy poca carga instalada actualmente, suficiente capacidad sobrante de carga, lo cual beneficiaba que, eventualmente, el camión se pudiera seguir recargando si se cortaba la energía eléctrica en el edificio. Asimismo, se corroboró que los espacios disponibles sí tenían el amperaje adecuado porque se le podían colocar “breakers” de 50 A, que sería un 125 % de la carga nominal de

cada cargador eléctrico que se deseaba instalar, la cual era de 40 A, lo cual cumplía con el artículo 625.40 del Código Eléctrico Nacional.

Una vez terminado el cálculo comparativo de la producción total de CO₂ a lo largo del ciclo de vida útil entre el camión diésel de carga pesada poseído actualmente por la empresa y el camión eléctrico de carga pesada que se seleccionó, se obtuvo que el camión de diésel producía 84.328,46 kg CO₂, mientras el camión eléctrico 7.289,04 kg CO₂, lo cual representa una producción de CO₂ 1057 % mayor para el camión diésel en cuestión (Salas, 2023).

De esta manera, se concluye que, desde el punto de vista del TCO, se logró realizar un análisis comparativo entre el VAN de costos totales del ciclo de vida útil del camión de carga pesada de diésel poseído por la empresa actualmente y del camión eléctrico de carga pesada seleccionado para este proyecto. En ese sentido, se identificó que la mejor opción financiera para la empresa era el camión de diésel, ya que el camión eléctrico era un 310 % más costoso a lo largo del ciclo de vida útil debido al elevado valor de los costos de adquisición del camión eléctrico y de los costos asociados a sus baterías (Salas, 2023).

Posteriormente, Barrantes (2023) desarrolló un estudio denominado: “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.” en el Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial. El autor basó este estudio en la necesidad de examinar las obligaciones de la empresa en términos de las peculiaridades de los buses de combustión que conservaban y su

contexto operativo para una posterior revisión de la oferta de buses eléctricos en el mercado con tipologías similares.

En dicho estudio, se evidenció que la batería del bus era 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. No obstante, los fabricantes de vehículos eléctricos que implementan baterías LFP establecen como meta que las baterías lleguen a 10 años de vida útil, por lo tanto, su funcionamiento y capacidad después de dicha longevidad no está asegurada.

Se realizó 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, lo cual permitió la comparación entre ambos. En dicho análisis, se encontró que el TCO de la flota de buses eléctricos, así 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 (Barrantes, 2023).

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de unidades eléctricas en el transporte público de la ruta de Grupo TUASA San José-Alajuela en el primer semestre del 2025.

Objetivos específicos

1. Definir los requerimientos técnicos necesarios para realizar el cambio de la flotilla utilizada en la ruta San José-Alajuela de unidades de combustión a unidades eléctricas.
2. Analizar los resultados de la investigación en cuanto a costos de mantenimiento, consumo energético e impacto ambiental de los automotores diésel y sus similares eléctricos.
3. Comparar los costos operativos y de inversión entre las unidades eléctricas y las unidades convencionales (diésel), para determinar la rentabilidad del cambio tecnológico.

JUSTIFICACIÓN

El presente estudio es significativo debido a la creciente necesidad de adoptar soluciones más sostenibles en el sector del transporte público, particularmente en Costa Rica. Este es un país comprometido con reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover prácticas más responsables con el medio ambiente.

En ese sentido, el transporte público es una de las principales fuentes de contaminación en las áreas urbanas, y la transición hacia un modelo de movilidad eléctrica se presenta como una alternativa viable para mitigar los efectos negativos del uso de combustibles fósiles.

Según la organización Sustainable Mobility for All (2021), el sector del transporte genera más de una cuarta parte de las emisiones globales de GEI

derivadas del uso de combustibles fósiles, lo cual subraya la urgencia de adoptar tecnologías limpias. En este contexto, el estudio de la viabilidad de la implementación de unidades eléctricas en la ruta de transporte público San José-Alajuela resulta relevante, ya que puede contribuir a reducir las emisiones contaminantes, mejorar la eficiencia energética y fomentar una movilidad más limpia y sostenible.

Este estudio cobra mayor importancia en Costa Rica debido a que la movilidad eléctrica es aún una temática incipiente, lo cual dificulta la implementación generalizada de vehículos eléctricos en el transporte público. A pesar de los compromisos del país para promover una movilidad más sostenible, como se establece en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de 2020, la falta de políticas públicas claras y la escasez de infraestructura adecuada dificultan una transición efectiva hacia un transporte público eléctrico.

Por otra parte, Ramírez y Ureña (2021) señalan que Costa Rica se comprometió a desarrollar un sistema de movilidad eficiente y basado en energía renovable, pero aún existen barreras que impiden su adopción masiva. Consecuentemente, la implementación de unidades eléctricas en el transporte público podría representar un paso clave para superar estos obstáculos y avanzar hacia un modelo de transporte alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Es necesario recalcar que la resolución de este problema traería consigo beneficios ambientales, sociales y económicos. Al reducir las emisiones de CO₂, se contribuiría significativamente a la mejora de la calidad del aire, lo cual tendría un

impacto directo en la salud pública de los ciudadanos. Asimismo, la disminución de los costos operativos a largo plazo asociados con el uso de unidades eléctricas podría resultar en una mayor eficiencia del sistema de transporte público. Esta investigación no solo tiene el potencial de transformar el sector del transporte, sino que también puede impulsar el cumplimiento de los compromisos nacionales de sostenibilidad y, por consiguiente, posiciona a Costa Rica como un referente en movilidad eléctrica en la región. En consecuencia, esta investigación se justifica, tanto en términos de su impacto ambiental, como en su potencial para contribuir al desarrollo económico y social del país.

ALCANCES Y PROYECCIONES

- 1 Se evidenciará bajo la modalidad de una entrevista, la apreciación de un grupo de choferes directos de la empresa de transportes, en temas respectivos al conocimiento sobre los impactos generados por un posible cambio tecnológico de sus unidades de movilidad.
- 2 Se desarrollará una encuesta a usuarios de la ruta San José - Alajuela y se graficarán las apreciaciones en temas como beneficios en la producción de gases contaminantes, contaminación audible y posibles ventajas en la utilización de transporte bajo energías limpias.
- 3 Se identificarán los requerimientos técnicos y de infraestructura necesarios para la implementación de unidades eléctricas en la ruta San José-Alajuela, incluyendo especificaciones de vehículos, estaciones de carga y adecuaciones operativas.

- 4 Se obtendrá una estimación cuantificada del impacto ambiental positivo de reemplazar autobuses diésel por eléctricos, especialmente en términos de reducción de emisiones de CO₂, y niveles de ruido en la zona en cuestión.
- 5 Se desarrollará un análisis comparativo de costos que permita determinar si la transición tecnológica es económicamente viable a corto, mediano y largo plazo, considerando inversión inicial, mantenimiento, costos energéticos y posibles incentivos.
- 6 El estudio permitirá generar una base de datos técnica y económica que podrá ser utilizada como insumo para la toma de decisiones por parte de operadores de transporte, autoridades gubernamentales y entes reguladores.

LIMITACIONES

Parte de las limitaciones se presentarán en el desarrollo del proyecto. En ese sentido, factores como datos sensibles o criterios con un análisis aún más profundo pueden generar interrogantes, o bien, proyectarse como áreas con poca relevancia.

Por el momento, como limitante, se puede mencionar el hecho de que, a nivel nacional, no existe una cadena o ruta completa de autobuses híbridos o completamente eléctricos, los cuales permitan consolidar una base sólida referente para fundamentar algunos conceptos.

La viabilidad de la implementación de cambio de unidades de combustión interna a unidades de propulsión eléctrica, se debe medir de acuerdo con diferentes

factores, entre ellos, el financiero. Básicamente, poner en evidencia las ganancias que definen el hecho de que el proyecto sea viable, representa un tema sensible para los dueños de las empresas. Por tanto, es probable que la información de esta índole no sea suministrada con exactitud.

Un segundo aspecto importante de mencionar, es el hecho de que el proyecto está estrictamente relacionado con la conservación del ambiente. Por ende, las emisiones de agentes contaminantes marcan la pauta para una futura elección. La información o estado real de los motores de combustión interna de su flotilla vigente, puede ser manipulada y no ofrecerse de manera veraz, ya que, como es de conocimiento, se puede engañar al sistema en términos de inspecciones vehiculares. Sin embargo, para tener datos reales y seguros, se debería realizar una inspección específica con herramientas y conocimientos en el ámbito de la mecánica. Dicha situación, con seguridad, no será permitida ni abordada por los empresarios autobuseros.

Un aspecto importante a considerar, es que no se detalla el proceso administrativo a seguir por parte de la suplidora de energía, para realizar la conexión a media tensión, aspectos como solicitudes, formularios, requisitos o contratos quedarán para un análisis a futuro en caso de formalización del proyecto.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Marco situacional

El contexto situacional de esta investigación define las condiciones y características del entorno donde se desarrollará el estudio. Este trabajo no se limita únicamente al análisis teórico, sino que pretende abordar y resolver una problemática concreta y real. En este sentido, Chen (2020) indica que el marco de referencia cumple una función esencial al reunir los antecedentes relacionados con el tema investigado (párr. 2).

Lo expuesto anteriormente sienta una base firme para la exploración y recolección de información pertinente, ya que permite abordar, en forma estructurada, distintos factores claves relacionados con la posibilidad de incorporar unidades eléctricas en el servicio de transporte público entre San José y Alajuela.

Desde una perspectiva operativa, económica y ambiental, el presente estudio de viabilidad se centrará en analizar los elementos incidentes en la posible transición hacia un modelo de movilidad eléctrica; en particular, se busca identificar variables como costos de implementación, infraestructura de carga requerida, aceptación de los usuarios, reducción de emisiones contaminantes y beneficios económicos y sociales derivados de dicha transformación, entre otras.

Reseña histórica de Grupo TUASA

Transportes Unidos Alajuelenses S.A. es una compañía dedicada al servicio de transporte público, la cual opera bajo el marco legal establecido por el Estado en esta materia, además de contar con las concesiones oficiales necesarias para brindar dicho servicio. Su actividad comenzó en 1953 impulsada por un grupo de

empresarios independientes que inicialmente ofrecían el recorrido entre Alajuela y San José en ambos sentidos (Grupo TUASA, 2024).

Con el transcurso del tiempo, la empresa ha experimentado un crecimiento significativo al ampliar su cobertura más allá de la ruta Alajuela-San José. Actualmente, ofrece servicios en trayectos como Alajuela-La Aurora, Alajuela-San Joaquín y Alajuela-Heredia. En la actualidad, la flota supera las 130 unidades. Cada autobús tiene una capacidad aproximada de 53 pasajeros sentados y un promedio de 25 personas de pie, dependiendo del tipo de unidad (Grupo TUASA, 2024).

El cobro del pasaje se realiza en el momento de abordar y el proceso se controla mediante un sistema electrónico de conteo de pasajeros por medio de barras. Ello permite comparar el ingreso económico por cada recorrido y por conductor con el propósito de garantizar precisión en la recaudación y evitar pérdidas económicas. Cabe destacar que esta empresa fue pionera en uniformar a sus choferes y en implementar tecnologías como los sistemas de conteo electrónico y dispositivos GPS, las cuales son medidas orientadas, tanto a la seguridad de los usuarios, como al bienestar del personal que labora en la organización (Grupo TUASA, 2024).

A. Misión. La empresa se compromete a ofrecer, a sus clientes y usuarios, un servicio de transporte terrestre remunerado de pasajeros caracterizado por altos estándares de calidad, puntualidad, seguridad y comodidad. Su objetivo es satisfacer plenamente las expectativas de los usuarios, garantizando así el bienestar de la comunidad (Grupo TUASA, 2024).

B. Visión. La empresa se fundamenta en ser una operadora líder en el sector de servicios de transporte público terrestre a nivel nacional, anticipando las

necesidades de los clientes y del mercado, y superando los estándares exigidos mediante la inversión, la creatividad y la innovación. Asimismo, busca garantizar el bienestar y desarrollo de su personal, contando con un capital humano capacitado y reconocido por la organización como el principal valor que impulsa su crecimiento. (Grupo TUASA, 2024).

C. Valores. La organización adopta valores fundamentales que orientan su desempeño institucional. La calidad se refleja en la excelencia con la que se prestan los servicios. La responsabilidad implica el compromiso de cada colaborador en el cumplimiento riguroso de sus funciones; asimismo, la seguridad se enfoca en establecer un vínculo de confianza sólido con los usuarios. Por último, la honestidad es promovida, tanto entre los integrantes de la empresa, como hacia los clientes, reconociendo que la transparencia constituye un pilar esencial para fortalecer la credibilidad y la confianza dentro de la institución (Grupo TUASA, 2024).

Ilustración 1 Terminal de buses Grupo TUASA San José Centro



Nota: Transportes Unidos Alajuelenses, 2025

Marco teórico

En esta sección, se presenta el marco teórico que sustenta conceptos fundamentales, como movilidad urbana sostenible, eficiencia energética, reducción de emisiones contaminantes y tendencias en innovación tecnológica aplicadas al transporte público. Este marco conceptual proporcionará la base que orientará el desarrollo de la investigación, lo cual permitirá comprender, en forma integral, los elementos que influyen en la viabilidad de implementar unidades eléctricas en la ruta de Grupo TUASA. Es necesario manifestar que establecer una dirección clara desde el punto de vista teórico es esencial para lograr una comprensión adecuada del objeto de estudio.

Asimismo, se considera que la investigación adopta un enfoque pertinente para los propósitos del estudio, pues se centra en un problema específico que responde a necesidades actuales en el ámbito del transporte urbano. Este enfoque metodológico se estima como la estrategia más apropiada para llevar a cabo el análisis de campo al permitir explorar, de manera profunda, la factibilidad técnica, económica y ambiental de la propuesta.

De acuerdo con lo señalado por Coronel (2023), la recopilación de datos durante el desarrollo del estudio no solo facilitará la validación de la hipótesis inicial, sino que también permitirá demostrar el aporte que esta investigación puede generar dentro del contexto nacional. Dicha situación permitirá determinar si el problema identificado requiere una intervención inmediata o si refleja un vacío de conocimiento que debe ser atendido. En conjunto, el marco teórico y el enfoque metodológico asegurarán la coherencia del análisis al promover una investigación

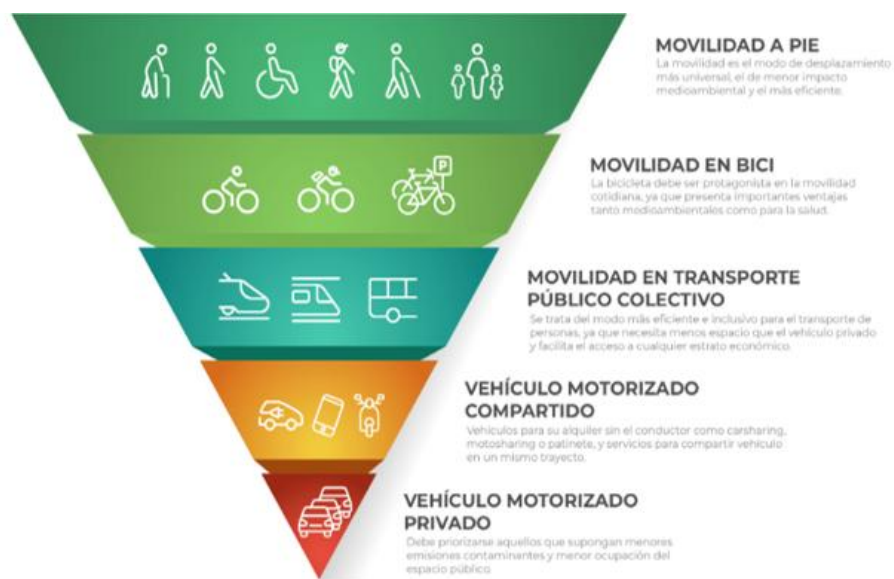
sólida que contribuya al avance en el diseño de soluciones sostenibles para el transporte público.

Movilidad sostenible

La movilidad sostenible es clave para transformar las ciudades en espacios más limpios y saludables. Apostar por un transporte público eficiente, el uso de bicicletas o simplemente caminar no solo reduce la huella de carbono, sino que también promueve una vida más activa y consciente. Al repensar cómo se desplazan, las comunidades pueden proteger el medio ambiente y mejorar su calidad de vida. Según Olivares, *et al.* (2022):

La movilidad urbana sostenible se refiere al movimiento de las personas dentro de las ciudades de manera que cause el menor daño posible al medio ambiente. Esto se logra mediante un sistema de transporte que sea accesible para todos, eficiente, seguro y con bajas emisiones de carbono (p.112).

Ilustración 2 Pirámide de la movilidad sostenible



Nota: Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible, 2025

Por otro lado, moverse a pie o en bicicleta tiene grandes beneficios, tanto para el medio ambiente, como para la salud. Estas opciones no solo son libres de emisiones contaminantes, sino que, al ser actividades físicas, aportan importantes beneficios en la prevención de enfermedades relacionadas con el sedentarismo, además de favorecer la salud mental. Este enfoque busca elevar la calidad de vida en las ciudades mediante soluciones que disminuyan las emisiones contaminantes y fomenten una movilidad más consciente.

En este sentido, la incorporación de unidades eléctricas en el transporte público se plantea como una estrategia efectiva para avanzar hacia un modelo de transporte más sostenible. Su adopción en rutas nuevas no solo ayudaría a reducir la huella ambiental, sino que también fortalecería un sistema de transporte moderno y alineado con el desarrollo urbano sostenible. De acuerdo con Olivares, *et al.* (2022), para implementar esta estrategia, se requieren cuatro acciones claves:

- a) Disminuir la necesidad de viajar, promoviendo el uso de tecnologías que permitan trabajar desde casa, realizar compras virtuales y establecer rutas eficientes.
- b) Incentivar el cambio modal, fomentando el uso de medios no motorizados como caminar y andar en bicicleta.
- c) Acortar los tiempos de viaje mediante un diseño urbano adecuado.
- d) Fomentar una mayor eficiencia en el transporte, promoviendo opciones con bajas emisiones de carbono (p.112).

Asimismo, es fundamental involucrar a la ciudadanía en los procesos de planificación para que comprendan la lógica detrás de estas decisiones y se inspiren

a cambiar sus hábitos de movilidad con el fin de minimizar sus emisiones y contribuir al bienestar colectivo.

Beneficios de la movilidad sostenible en el contexto urbano. La movilidad sostenible es de gran importancia en el contexto urbano de Costa Rica debido a los crecientes desafíos ambientales, sociales y económicos enfrentados por el país, especialmente en sus principales ciudades.

La movilidad sostenible busca mejorar el transporte reduciendo su impacto ambiental, económico y social. Por lo tanto, el uso excesivo del transporte privado ha generado altos niveles de congestión vehicular, contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual afecta la salud pública y la calidad de vida de la población. Al respecto, Díaz, *et al.* (2023) argumenta que:

Uno de los principales beneficios de la movilidad eléctrica es la reducción de la contaminación del aire, ya que el uso de vehículos eléctricos o no contaminantes disminuye significativamente la emisión de gases de efecto invernadero. Esto no solo contribuye a la lucha contra el cambio climático, sino que también mejora la salud pública al permitir que las personas respiren un aire más limpio. Al mismo tiempo, esta transición tiene un impacto económico positivo, ya que, aunque la implementación de autobuses eléctricos implica una inversión inicial considerable, a largo plazo se reducen los costos en combustible y mantenimiento. Por lo que, esta iniciativa suele generar empleo, atraer inversiones y fortalecer la imagen del país como un modelo de sostenibilidad (pp. 12-13).

De acuerdo con Díaz, *et al.* (2023), el promover alternativas sostenibles como transporte público eficiente, uso de bicicletas y vehículos eléctricos contribuye a reducir estos impactos negativos. Asimismo, una movilidad urbana sostenible fomenta la inclusión social al facilitar el acceso equitativo a servicios, empleos y educación, el cual apoya los compromisos nacionales e internacionales de Costa Rica en materia de cambio climático y desarrollo sostenible.

Por lo tanto, implementar políticas que favorezcan este tipo de movilidad es clave para construir ciudades más resilientes, accesibles y respetuosas con el medio ambiente.

Ilustración 3 Contaminación del aire y la salud



Nota: Instituto Nacional de Salud Pública, Gobierno de México, 2025

Transporte público

El transporte público es un elemento fundamental para la movilidad urbana de muchas personas y los autobuses son uno de los medios más utilizados a nivel mundial. En este contexto, los autobuses eléctricos se perfilan como una de las soluciones claves para lograr un sistema de transporte más sostenible y eficiente en las ciudades. Sin embargo, su adopción ha sido relativamente lenta, con la notable excepción de China, donde actualmente opera el 98 % de los autobuses eléctricos a nivel global (Villalba, *et al.*, 2021).

Muchos países han comenzado a implementar políticas públicas orientadas a la transición hacia flotillas de autobuses eléctricos con el propósito de mejorar la calidad del servicio, reducir el impacto ambiental y generar beneficios sociales y económicos. En el caso de Costa Rica, y particularmente en la Gran Área Metropolitana (GAM), el transporte público enfrenta diversos retos que amenazan su funcionalidad y atractivo frente a otros medios. Para Agüero, *et al.* (2021), el transporte público ha venido perdiendo usuarios en favor de otros métodos, lo cual representa una amenaza no solo para el sector, sino para el desarrollo sostenible de la región en su conjunto. Considerando lo anterior, se deben considerar los siguientes aspectos:

- a) Ha perdido participación en la demanda de transporte de la GAM, pasando del 41 % de los viajes en 2007 al 34 % en 2017.
- b) Los tiempos de viaje han aumentado considerablemente debido a la dispersión de la ciudad y al crecimiento del parque vehicular, lo cual incrementa la congestión vial.

- c) En conjunto, la disminución del uso del transporte público y el aumento de los tiempos de viaje generan mayores emisiones de gases de efecto invernadero y pérdidas económicas por los retrasos acumulados en los desplazamientos (Agüero, *et al.*, 2021, p.1).

La pérdida de usuarios, la congestión y las emisiones contaminantes son consecuencias directas de un sistema ineficiente. Por lo tanto, la electrificación de la flota no solo contribuiría a reducir las emisiones, sino que también podría modernizar el servicio y hacerlo más competitivo al promover su uso entre la población. Consecuentemente, la transición hacia autobuses eléctricos representa una estrategia integral para mejorar la movilidad, mitigar el cambio climático y fortalecer el desarrollo urbano sostenible.

Importancia del transporte público en la movilidad urbana. El transporte público es un medio esencial de movilidad y desempeña un papel crucial en el desarrollo de la sociedad, siendo especialmente relevante para el crecimiento socioeconómico de cualquier nación. Este sistema está estrechamente vinculado con las actividades económicas del país al establecer una conexión significativa entre los servicios ofrecidos, la cantidad de viajes realizados y el número de pasajeros transportados (Sangroni, *et al.*, 2021).

Asimismo, el transporte público es fundamental para la movilidad urbana, ya que permite el traslado eficiente de grandes grupos de personas, reduce la congestión vehicular y contribuye a la sostenibilidad ambiental. Su uso adecuado disminuye la dependencia del automóvil particular, lo cual reduce las emisiones contaminantes, mejora la calidad del aire y promueve una ciudad más equitativa al

facilitar el acceso a servicios, educación y empleo para personas de distintas condiciones socioeconómicas.

Un sistema de transporte público bien diseñado también optimiza el uso del espacio urbano y genera beneficios económicos al acortar los tiempos de desplazamiento y crear fuentes de empleo. En este contexto, fomentar el uso del transporte colectivo se convierte en un pilar esencial para lograr una movilidad urbana más eficiente, inclusiva y sostenible (Leutenegger, *et al.*, 2022).

En este marco, el estudio sobre la implementación de unidades eléctricas en el transporte público de la ruta de Grupo TUASA cobra gran relevancia, pues representa un paso estratégico hacia la modernización del sistema de transporte en Costa Rica. Esta iniciativa no solo apunta a reducir la huella de carbono del sector transporte, el cual es uno de los mayores emisores de gases contaminantes, sino que también busca mejorar la eficiencia operativa y la experiencia del usuario.

Al sustituir unidades tradicionales por vehículos eléctricos, se promueve un modelo de transporte más limpio, silencioso y tecnológicamente avanzado, además de estar alineado con los objetivos nacionales de sostenibilidad y transición energética. Al mismo tiempo, el proyecto tiene el potencial de generar datos valiosos para futuras políticas públicas en movilidad eléctrica y contribuir al posicionamiento del país como líder regional en soluciones de transporte sustentable.

Problemática ambiental y social del uso de combustibles fósiles. El uso intensivo de combustibles fósiles, como petróleo, gas natural y carbón, es uno de los principales factores que ejercen presión sobre el medio ambiente y las sociedades actuales.

Desde una perspectiva ambiental, la combustión de estos recursos libera gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Ello ha provocado un aumento constante de la temperatura global, el deshielo de los glaciares y una mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos (Maya, 2020).

A su vez, Cuevas (2023) señala que el agotamiento progresivo de estos combustibles plantea una crisis de sostenibilidad que debe ser abordada de manera integral, por lo tanto, consideraría las dimensiones ecológicas, económicas y sociales. Al mismo tiempo del impacto ambiental, el uso de combustibles fósiles tiene profundas repercusiones sociales. Por consiguiente, las actividades relacionadas con su extracción y transporte suelen llevarse a cabo en regiones vulnerables al generando daños significativos, tanto al entorno natural, como a las comunidades locales.

Asimismo, la dependencia de los combustibles fósiles restringe la soberanía energética de los países, haciéndolos vulnerables a las fluctuaciones del mercado internacional. Esta situación afecta especialmente a las economías más débiles, las cuales deben destinar grandes recursos al pago de combustibles importados, en lugar de invertir en alternativas renovables y sostenibles (Guzmán, *et al.*, 2020).

Ante esta problemática, se hace evidente la necesidad de una transición energética justa que no solo sustituya las fuentes fósiles por energías limpias, sino que también garantice un acceso equitativo, fomente la participación ciudadana y respete los derechos de las comunidades.

Ilustración 4 Daños en la Salud debido a la contaminación del aire



Nota: Surmedikal Oxigenoterapia, 2020

Movilidad eléctrica

De acuerdo con Moya, *et al* (2017):

La movilidad eléctrica se refiere al uso de vehículos impulsados total o parcialmente por energía eléctrica, en sustitución de los combustibles fósiles convencionales. Este concepto ha ganado relevancia global por su papel

crucial en la lucha contra el cambio climático y por los beneficios que ofrece en términos de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y salud pública (p.10).

Según la Agencia Internacional de Energía, el número de vehículos eléctricos en circulación superó los 16 millones a nivel mundial en 2021, y las proyecciones apuntan a un crecimiento aún más acelerado en los próximos años (IEA, 2022).

Este aumento no es casual, ya que responde a una combinación de políticas públicas, incentivos fiscales y avances tecnológicos. Por lo tanto, la tendencia evidencia cómo los gobiernos están comenzando a reconocer que la transformación del transporte es indispensable para cumplir con los compromisos del Acuerdo de París.

Uno de los mayores aportes de la movilidad eléctrica es su alta eficiencia energética. Mientras tanto, un motor de combustión interna convierte apenas entre el 20 % y 30 % de la energía del combustible en movimiento útil, los motores eléctricos superan el 85 % de eficiencia (U.S. Department of Energy, 2023). Esta diferencia notable significa que los vehículos eléctricos no solo consumen menos energía, sino que también aprovechan mejor la que utilizan, lo cual contribuye a una reducción significativa de la huella ecológica del transporte terrestre. Además, al no emitir contaminantes directos, favorecen una mejora en la calidad del aire, particularmente en las ciudades con alta densidad vehicular.

Sin embargo, esta transición no está exenta de desafíos, por lo tanto, la adopción masiva de vehículos eléctricos requiere una infraestructura de carga

amplia, accesible y confiable, que actualmente está en etapas de desarrollo en muchos países. En este sentido, McKerracher, *et al.* (2022) advierte que la descarbonización del transporte no puede lograrse solo electrificando vehículos, sino también garantizando que la electricidad provenga de fuentes limpias.

Esto implica que la movilidad eléctrica debe ir de la mano con una transición energética más amplia hacia las energías renovables.

Desde el punto de vista económico y social, la movilidad eléctrica ofrece múltiples oportunidades. Por ejemplo, puede generar nuevos empleos en sectores como la manufactura de baterías, el mantenimiento especializado y el desarrollo de infraestructura de carga. Asimismo, reduce la dependencia de combustibles fósiles importados, lo cual fortalece la soberanía energética de los países. Además, la mejora en la calidad del aire urbano se traduce en beneficios tangibles para la salud pública, como reducción de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. De acuerdo con Michelena (2023), la movilidad eléctrica no solo es sostenible en lo ambiental, sino también viable en el aspecto económico y socialmente inclusiva si se implementa con políticas adecuadas.

Considerando lo anterior, Costa Rica se ha posicionado como un país líder en la región al promulgar la Ley 9518 de promoción de la movilidad eléctrica, la cual contempla incentivos económicos como exoneración de impuestos sobre las ventas, impuesto sobre el valor aduanero, extensión al impuesto a la propiedad, además de no económicos como exentos a restricciones vehiculares, pago de parquímetros y estacionamientos en espacios especiales. Según Krieger (2022), esta legislación ha sido fundamental para fomentar la importación de vehículos

eléctricos y establecer puntos de carga en distintas zonas del país. Este caso demuestra que, con voluntad política y visión estratégica, los países en desarrollo también pueden ser actores claves en la transformación hacia un transporte más limpio y moderno.

Ventajas de la movilidad eléctrica en comparación con el diésel.

El cambio de tecnologías que utilizan combustibles fósiles, como el diésel, hacia sistemas de movilidad eléctrica, implica una transformación importante en cómo las sociedades manejan aspectos como transporte, consumo de energía y sostenibilidad ambiental. A pesar de que los vehículos diésel han sido apreciados por su eficiencia en viajes largos y su capacidad para el transporte de cargas pesadas, progresos tecnológicos y la necesidad urgente de disminuir las emisiones contaminantes han hecho que la movilidad eléctrica se considere una opción más favorable desde diversas perspectivas.

Reducción de emisiones contaminantes. Los vehículos eléctricos no producen emisiones directas de gases contaminantes mientras funcionan, a diferencia de los vehículos diésel, los cuales liberan dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas finas. Estas emisiones están relacionadas con problemas de salud pública y el cambio climático. Un estudio publicado en *Science of the Total Environment* resalta que la adopción generalizada de VE podría disminuir considerablemente la contaminación del aire, lo cual podría salvar, de manera potencial, cientos de miles de vidas cada año (Carey, 2023).

Menores costos operativos y de mantenimiento. Si bien los vehículos eléctricos, requieren una inversión inicial más alta, sus costos asociados al uso y

mantenimiento son considerablemente más bajos que los de los vehículos diésel. Esta diferencia se explica porque poseen un sistema mecánico más simple, con menos piezas móviles, y no necesitan cambios de aceite ni de filtros. Asimismo, la electricidad, utilizada como fuente de energía, suele ser más económica que el diésel. Un estudio publicado en la revista *Applied Sciences* respalda esta afirmación al indicar que los VE resultan más rentables en términos operativos debido, tanto a su bajo requerimiento de mantenimiento, como al menor costo de la electricidad frente a los combustibles tradicionales (Analazi, 2023).

Mayor eficiencia energética. Los motores eléctricos convierten una porción más significativa de la energía almacenada en movimiento útil que los motores diésel. Ello se traduce en una mayor eficiencia energética y un menor consumo para recorrer distancias similares. Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), los vehículos eléctricos utilizan la energía de forma más eficiente, lo cual contribuye a reducir el consumo general de energía en el ámbito del transporte (U.S. Department of Energy, 2023).

Menor contaminación acústica. Los motores eléctricos convierten una mayor cantidad de la energía acumulada en energía cinética útil en comparación con los motores diésel. Por lo tanto, se genera eficiencia energética superior y un menor consumo de energía para recorrer distancias similares. Según la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), los vehículos eléctricos utilizan la energía de manera más eficiente, lo cual contribuye a reducir el consumo general de energía en el sector del transporte (U.S. Department of Energy, 2023).

Mayor vida útil y fiabilidad. Investigaciones recientes sugieren que los vehículos eléctricos (VE) pueden tener una duración de vida similar o incluso superior a la de los automóviles diésel. Un estudio publicado en la revista Nature Energy revela que, en el Reino Unido, la vida útil promedio de los coches eléctricos es de 18.4 años, frente a los 16.8 años de los vehículos diésel. Además, los VE tienden a presentar menos problemas mecánicos gracias a su diseño más simplificado y a la reducción en el número de piezas móviles (Bicer, 2025).

La transición hacia la movilidad eléctrica presenta diversas ventajas sobre los vehículos diésel, especialmente en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa. Los vehículos eléctricos eliminan las emisiones directas de gases contaminantes, lo cual contribuye, de manera significativa, a la mejora de la calidad del aire y la salud pública. Aunque la inversión inicial es mayor, estos vehículos generan menores costos operativos y de mantenimiento debido a su sistema mecánico más simple y al uso de electricidad más económica que el diésel. Asimismo, presentan una mayor eficiencia energética al optimizar el consumo de energía y generan menos contaminación acústica.

La vida útil de los vehículos también tiende a ser superior con menos fallos mecánicos debido a su diseño simplificado. Estos aspectos hacen de la movilidad eléctrica una opción viable y atractiva para la modernización del transporte público, como se analiza en el estudio de viabilidad para la implementación de unidades eléctricas en la ruta San José - Alajuela de Grupo TUASA.

Ilustración 5 Comparación constructiva del chasis Autobús Eléctrico vs Diésel



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Vehículo eléctrico

Los vehículos eléctricos representan una opción tecnológica y ecológica que se plantea como alternativa a los automóviles con motores de combustión interna, ya que operan con uno o más motores eléctricos que utilizan baterías recargables como fuente de energía.

En este sentido, Galarza (2021) argumenta que, en los últimos años, esta tecnología ha cobrado relevancia debido a la urgencia de disminuir las emisiones de gases contaminantes, optimizar el uso de la energía y fomentar una movilidad más sostenible. Es decir, la creciente adopción de vehículos eléctricos no solo refleja un cambio hacia una mayor conciencia ambiental, sino que también responde a nuevas dinámicas del mercado automotriz, a políticas públicas promotoras de su uso y a avances tecnológicos que han hecho posible su viabilidad y accesibilidad.

Es necesario recalcar que el concepto de vehículo eléctrico no es novedoso, pues su origen se remonta al siglo XIX. No obstante, su evolución ha estado limitada por obstáculos tecnológicos relacionados con el almacenamiento de energía y la autonomía. Por lo tanto, en las últimas décadas, los avances en baterías de iones

de litio, la expansión de la infraestructura de carga y la implementación de políticas de incentivo han impulsado su adopción a nivel global.

Como explican Hathaway, *et al.* (2024), la evolución de los vehículos eléctricos ha sido impulsada por la mejora constante de las baterías, la reducción de los costos de fabricación y un creciente respaldo gubernamental; estos avances han permitido que las experiencias virtuales sean accesibles para el consumidor promedio y superen muchas de las barreras iniciales, como la autonomía limitada o los elevados costos.

Asimismo, Hathaway, *et al.* (2024) destacan tres factores fundamentales en la evolución de los vehículos eléctricos: tecnología, economía e intervención pública; por lo tanto, esta triple dimensión demuestra que su desarrollo no ha sido casual, sino el resultado de una convergencia de fuerzas que han favorecido su integración en el mercado masivo.

Mantenimiento y costos operativos de los vehículos eléctricos

Una de las grandes ventajas de los vehículos eléctricos en comparación con los de combustión interna es la disminución de los costos, tanto operativos, como de mantenimiento. Debido a que cuentan con menos componentes móviles, los vehículos eléctricos requieren menos atención mecánica. Asimismo, su mayor eficiencia energética contribuye a que los gastos por cada kilómetro recorrido sean más bajos.

Los gastos de mantenimiento de un automóvil varían y no son fijos, pues se encuentran influenciados por factores como kilometraje y tipo de motor, entre otros. Este estudio busca comparar los costos de mantenimiento entre un autobús

eléctrico y uno de combustión interna, anticipando que la opción eléctrica tendrá un costo anual más bajo, ya que cuenta con menos piezas en comparación con el modelo de combustión (Rojas, 2020). Sin embargo, en componentes como los sistemas de suspensión, no se prevé una diferencia significativa, dado que son sistemas bastante parecidos.

Componentes principales del vehículo eléctrico. Los vehículos eléctricos (VE) se componen de diversos elementos esenciales que, en conjunto, permiten su operación eficiente y amigable con el ambiente. Entre estos, el motor eléctrico destaca como el encargado de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. Existen diversos tipos de motores utilizados en los VE, tales como motores de inducción y síncronos de imanes permanentes (Montes, 2021).

Esta variedad de motores responde a la necesidad de adaptar el rendimiento de la unidad a distintos contextos de uso y niveles de eficiencia. El motor es acompañado por la batería de tracción, generalmente de ion-litio, la cual actúa como la fuente principal de energía. Su capacidad y tecnología son determinantes para la autonomía del vehículo, siendo uno de los aspectos más valorados por los consumidores (Vicente, 2021).

La energía contenida en la batería debe ser convertida adecuadamente para ser aprovechada por el motor; por ello, el inversor es otro componente clave, ya que transforma la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) necesaria para el funcionamiento del motor. Por lo tanto, se enfatiza que el cargador de a bordo cumple un rol fundamental en el proceso de recarga al convertir la corriente alterna de la red eléctrica doméstica en corriente continua que alimenta la batería.

Asimismo, la unidad de control electrónico (ECU) desempeña una función estratégica al coordinar el trabajo de todos estos componentes, por tanto, asegura una operación segura y optimizada. Según Anónimo (2021), este “cerebro” del vehículo supervisa aspectos como el frenado regenerativo, el cual permite recuperar parte de la energía cinética generada durante el frenado, almacenándola nuevamente en la batería. Dicha capacidad de retroalimentación energética no solo mejora la autonomía del vehículo, sino que también subraya una de las principales ventajas de los VE frente a los motores de combustión interna.

En ese sentido, Montes (2021) destaca también la simplicidad del sistema de transmisión, el cual, en la mayoría de los casos, es de una sola velocidad al aprovechar el par motor constante de los eléctricos. Asimismo, el sistema de gestión térmica mantiene la temperatura óptima del motor, la batería y otros componentes críticos. Por tanto, garantiza la seguridad y el rendimiento a largo plazo.

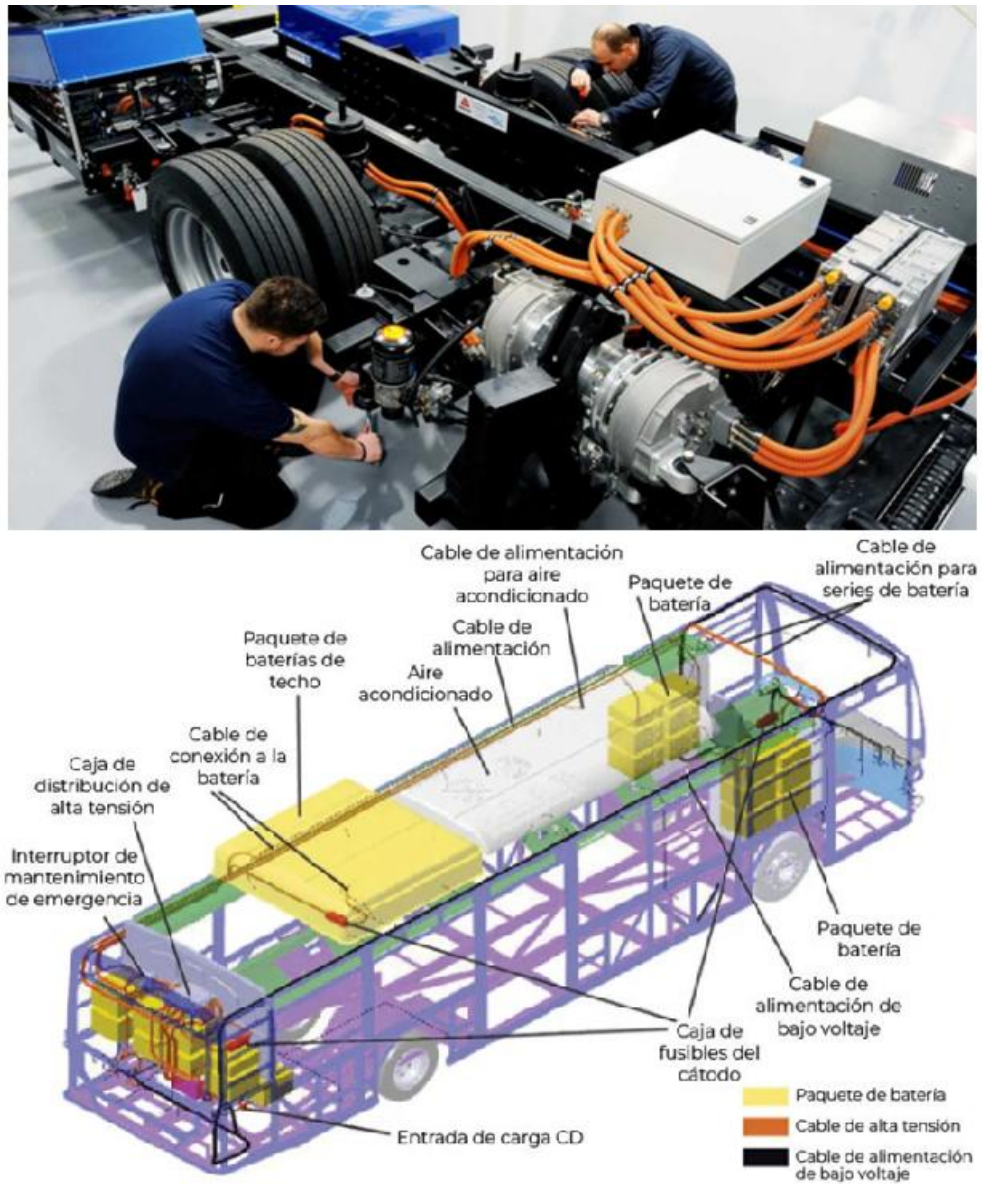
Funcionamiento del vehículo eléctrico

El funcionamiento del vehículo eléctrico comienza con la recarga desde una fuente externa. Luego de ser transformada por el cargador de a bordo, esta energía se almacena en la batería. Posteriormente, el inversor y la unidad de control electrónico (ECU) trabajan conjuntamente para entregar energía al motor según las condiciones de conducción. Es decir, durante la marcha, el sistema de frenado regenerativo entra en acción cuando es necesario, cerrando así un ciclo de eficiencia energética notable.

En conjunto, estos procesos evidencian cómo la ingeniería detrás de los VE integra elementos tecnológicos avanzados con un enfoque claro hacia la

sostenibilidad (Vicente, 2021). Esto convierte al vehículo eléctrico en una alternativa viable y cada vez más adoptada a nivel global frente a los desafíos del cambio climático y la transición energética.

Ilustración 6 Distribución de los componentes del Autobús Eléctrico



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Tecnología de propulsión y almacenamiento de energía. La evolución de la tecnología de propulsión y almacenamiento de energía en los vehículos eléctricos (VE) ha sido impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes. En cuanto a la propulsión, los sistemas híbridos han ganado relevancia al combinar motores eléctricos con motores de combustión interna, lo cual permite optimizar el consumo de combustible y las emisiones, y facilita una transición progresiva hacia la electrificación total del transporte (Mejía, *et al.*, 2022). Esta combinación ha demostrado ser una solución efectiva en contextos donde aún persisten limitaciones tecnológicas o de infraestructura para vehículos totalmente eléctricos.

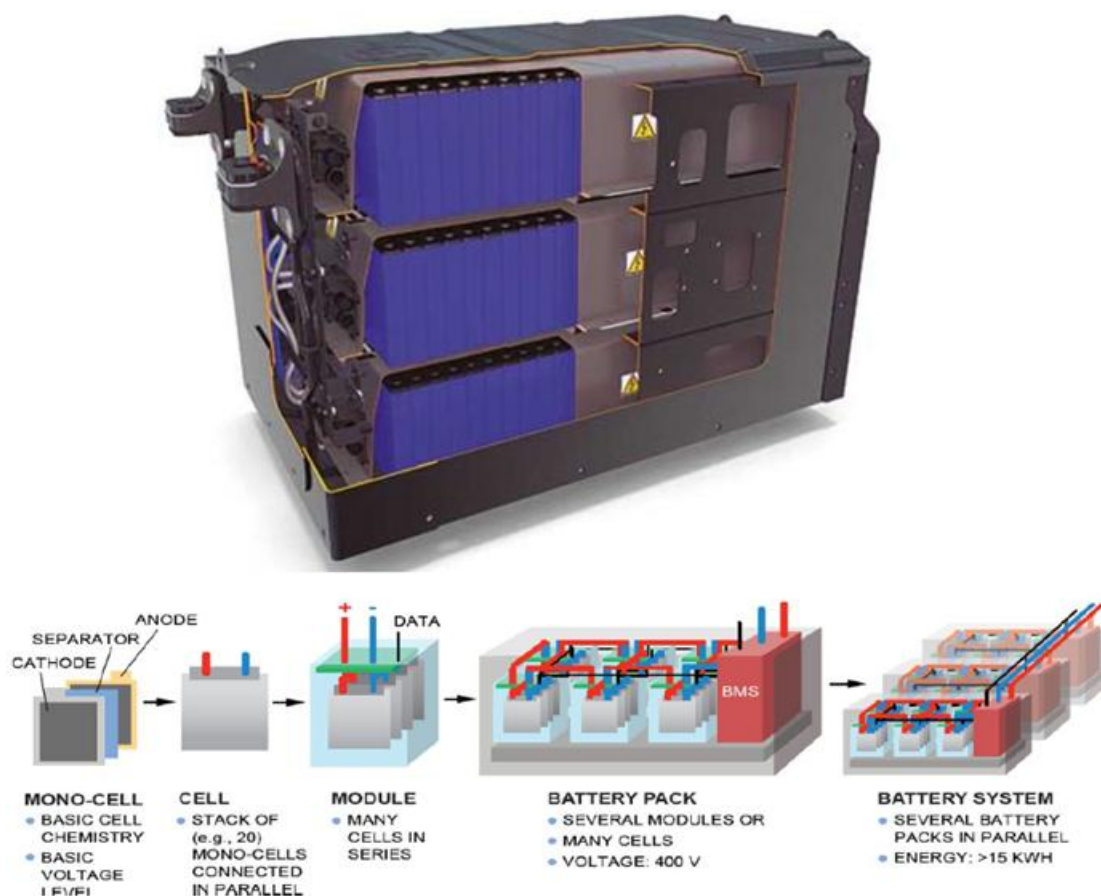
Por otra parte, en el ámbito del almacenamiento de energía, las baterías de ion-litio se han consolidado como la opción predominante debido a su alta densidad energética, su capacidad de soportar múltiples ciclos de carga y su larga vida útil (Maldonado, *et al.*, 2024).

No obstante, su funcionamiento seguro requiere sistemas de gestión avanzados que regulen variables como voltaje, temperatura y estado de carga para maximizar el rendimiento y prevenir riesgos; de esta manera, se están investigando tecnologías emergentes como las celdas de combustible de hidrógeno, las cuales ofrecen una mayor autonomía y tiempos de recarga más reducidos, aunque enfrentan importantes retos asociados con la infraestructura necesaria y la eficiencia en el almacenamiento del hidrógeno (Ministerio de Energía, 2021).

Por lo tanto, la integración de sistemas de propulsión eficientes y tecnologías de almacenamiento robustas se convierte en un eje clave para la movilidad

sostenible, donde la innovación científica y técnica es fundamental para avanzar hacia un modelo de transporte limpio y competitivo.

Ilustración 7 Módulos y paquetes de baterías



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Infraestructura de recarga

La infraestructura de carga para vehículos eléctricos es fundamental para promover su adopción y asegurar un uso eficiente. Asimismo, debe ajustarse a las particularidades de la red eléctrica local, incluyendo la frecuencia y el voltaje, para garantizar una carga segura y eficaz. Dentro de los tipos de carga, se encuentran los siguientes:

A. Recarga convencional o lenta

Este tipo de recarga utiliza la corriente y el voltaje estándar de una vivienda, típicamente 16 amperios y 230 voltios, con una potencia inferior a 10 kW. El tiempo estimado para completar la carga es de entre 8 y 10 horas, por lo tanto, es ideal para realizarse durante la noche en el hogar. Además, cargar el vehículo en horario nocturno resulta más eficiente desde el punto de vista energético, debido a que la demanda eléctrica es menor en esas horas (Maldonado, *et al.*, 2024).

B. Recarga semirrápida

Funciona también a 230 voltios en corriente alterna, pero con una intensidad eléctrica superior, alrededor de 32 amperios, lo cual permite una potencia de cerca de 7.3 kW. El tiempo de carga se reduce a aproximadamente 4 horas, por lo tanto, también resulta conveniente para realizarse en garajes durante la noche, ya sea en residencias o lugares de trabajo (Maldonado, *et al.*, 2024).

C. Recarga rápida

Para este tipo de recarga, se requiere una instalación con una potencia mucho mayor, lo cual no es factible en el ámbito doméstico. Utiliza corriente continua con potencias cercanas a 50 kW, lo cual posibilita cargar alrededor del 65 % de la batería en solo 15 minutos. Este tipo de recarga es común en estaciones de servicio o puntos públicos al facilitar la movilidad en viajes de larga distancia (Maldonado, *et al.*, 2024).

Puntos de recarga. Los puntos de recarga se pueden clasificar en los siguientes:

A. Públicos

Los puntos de recarga eléctrica pueden ubicarse en vías públicas o en grandes superficies, como estacionamientos, con una potencia de recarga de media demanda que oscila entre 10 y 50 kW AC, tanto en trifásico, como en monofásico, proporcionando velocidades de carga lenta y semirrápida. Por otro lado, los puntos de recarga en estaciones de servicio requieren una demanda alta superior a 50 kW, permitiendo cargas rápidas debido a su localización frecuentada, donde el tiempo de estadía es aproximadamente de 15 minutos para cargar hasta el 80 % de la batería (Maldonado, *et al.*, 2024).

Ilustración 8 Esquema de estación de carga pública



Nota: Maldonado, 2024

B. Privados

Los puntos de carga privados, situados en garajes o centros de trabajo, generalmente, tienen potencias inferiores a 10 kW en corriente alterna monofásica (220/230 V). Esta configuración permite el uso de estaciones de carga convencionales o lentas, aprovechando las tarifas nocturnas para realizar una carga completa de manera económica (Maldonado, *et al.*, 2024).

Ilustración 9 Instalación de toma de carga en una localización domiciliaria



Nota: Maldonado, 2024

Aunque la instalación de paneles solares en el hogar es una opción viable para cargar vehículos eléctricos, la tecnología actual presenta ciertas limitaciones. Por lo tanto, la generación de energía solar no es suficiente para realizar viajes largos, incluso si el vehículo está expuesto al sol durante todo el día. De manera conjunta, la alternativa de instalar paneles solares para la carga auxiliar de los sistemas de 12V no resulta económicamente efectiva en comparación con la energía eléctrica convencional.

C. Estaciones de servicio

Estas instalaciones, comúnmente integradas en gasolineras tradicionales, han evolucionado para incluir puntos de recarga rápida de vehículos eléctricos. Su principal ventaja radica en su ubicación estratégica, ya que suelen encontrarse a lo largo de autopistas, rutas interurbanas y vías de alto tránsito, lo cual las convierte en puntos ideales para facilitar los viajes de larga distancia. Estas estaciones están diseñadas para ofrecer una experiencia eficiente al reducir, en forma significativa, el tiempo de carga mediante el uso de tecnología de recarga rápida o ultrarrápida. Existen estaciones de tipo pedestal y tipo pantógrafo, este último realiza la carga por la parte superior de la unidad permitiendo una conexión segura, este diseño se especializa en las flotas que por un tema de espacio colocan las baterías en la parte superior del chasis.

Ilustración 10 Estaciones de servicio eléctrico



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Marco jurídico

En esta sección, se definen las pautas legales y normativas regulatorias de la implementación de unidades eléctricas en el transporte público; asimismo, se establece la protección que deben recibir, tanto los usuarios, como el personal operativo dentro del sistema de transporte. Por ende, el marco legal proporciona un

conjunto de disposiciones jurídicas que determinan cómo deben desarrollarse e implementarse estas nuevas tecnologías de movilidad, esto en el contexto de Grupo TUASA, lo cual garantizaría el cumplimiento de estándares técnicos, ambientales y de seguridad.

En este sentido, Bittan (2016), citado por Meneses (2016), sostiene que:

El marco jurídico, en el ámbito del comercio internacional, representa una de sus características más importantes, ya que constituye el conjunto normativo al que están sujetas las operaciones de los agentes económicos para dotarlas de la debida legalidad (p.168).

Esta sección tiene como objetivo específico respaldar al investigador en una alineación general y equilibrada en la internalización de las normas que se presentan en una organización jurídica, utilizando estas como un marco referencial para delimitar las competencias de las organizaciones jurídicas.

Ley N.º 9518: Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico en Costa Rica

La Ley N.º 9518, denominada “Ley de Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico”, fue aprobada en Costa Rica en 2018 con el objetivo de fomentar el uso de vehículos eléctricos como parte de una estrategia nacional de descarbonización. Esta legislación promueve la utilización de la movilidad eléctrica, tanto en el sector público, como en el privado al detallar incentivos y exoneraciones en la adquisición de este tipo de unidades, tales como eliminación parcial o total de impuestos de ventas, selectivo de consumo, aduanero y de propiedad.

En su capítulo VI, artículo 26, la ley establece como prioridad nacional la utilización de energía eléctrica renovable en el transporte público, incluyendo ferrocarril, trenes, buses, taxis y otros medios. Asimismo, promueve la importación y producción local de tecnologías para dicho fin en concordancia con el Plan Nacional de Transporte Eléctrico. Del mismo modo, el artículo 28 indica que las concesiones de autobuses deberán iniciar una sustitución paulatina de sus flotas hacia vehículos eléctricos bajo autorización técnica y legal del MOPT, y conforme a las condiciones financieras y de ruta, proyectando un reemplazo de al menos el 5 % cada dos años (Asamblea Legislativa, 2018).

A pesar de sus avances, la implementación enfrenta desafíos como alto costo inicial de los vehículos, limitada infraestructura de carga fuera del área metropolitana y necesidad de mayor educación al consumidor. No obstante, esta ley constituye un paso significativo hacia una movilidad más sostenible al posicionar a Costa Rica como un referente regional en la lucha contra el cambio climático y la promoción de energías limpias.

Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030

El Plan Nacional de Transporte Eléctrico (PNTE) 2018-2030 de Costa Rica es una iniciativa clave que tiene como objetivo transformar el sector del transporte hacia un modelo más sostenible y sin emisiones. Esta estrategia está en consonancia con los compromisos internacionales del país en relación con el cambio climático y el desarrollo sostenible.

El PNTE tiene como propósito fundamental impulsar la transición hacia una mayor integración de energías renovables en la matriz energética del país a través de la electrificación de todos los modos de transporte. Esta iniciativa está diseñada para mejorar la calidad del aire en las áreas urbanas, lo cual repercutirá positivamente en la salud de las personas y generará un impacto en la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), apoyando así las políticas de descarbonización del país (Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), 2025).

Entre sus estrategias, se destacan las siguientes:

- a) Reemplazar gradualmente la flota nacional de vehículos convencionales por vehículos eléctricos.
- b) Incorporar vehículos eléctricos en la flotilla del Estado.
- c) Desarrollar la electrificación del transporte público, especialmente en la Gran Área Metropolitana.
- d) Establecer incentivos fiscales y financieros para la adquisición de vehículos eléctricos.
- e) Fortalecer la infraestructura de recarga eléctrica.
- f) Fomentar la investigación y el desarrollo en tecnologías de electromovilidad (Díaz, *et al.*, 2023).

La implementación de estrategias orientadas a la electromovilidad representa un avance significativo para la sociedad en múltiples dimensiones. En primer lugar, el reemplazo gradual de vehículos convencionales por vehículos eléctricos contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, lo cual mejora la calidad del aire y, por ende, la salud pública. Esto es especialmente relevante en áreas urbanas

como la Gran Área Metropolitana, donde la concentración de vehículos y la contaminación atmosférica afectan en forma directa a miles de personas.

Incorporar vehículos eléctricos en la flotta del Estado y electrificar el transporte público promueve una movilidad más sostenible y accesible, reduciendo el impacto ambiental y fomentando un uso responsable de los recursos naturales. A su vez, los incentivos fiscales y financieros facilitan la adopción masiva de tecnologías limpias, lo cual democratiza el acceso a opciones de transporte más amigables con el medio ambiente.

El fortalecimiento de la infraestructura de recarga eléctrica garantiza la viabilidad y comodidad para los usuarios de vehículos eléctricos al incentivar su uso continuo. Finalmente, fomentar la investigación y desarrollo en electromovilidad impulsa la innovación tecnológica, por tanto, genera empleo especializado y posiciona a la sociedad en un contexto global de transición hacia energías limpias y sostenibles.

Por otro lado, un análisis realizado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) proyecta que, para alcanzar los objetivos del Plan Nacional de Descarbonización del país para 2030, será necesario incrementar en un 12,7 % las inversiones en generación y transmisión eléctrica en la provincia de San José. Asimismo, se necesitarán inversiones anuales equivalentes al 0,35 % del Producto Interno Bruto (PIB) hasta 2030 para la adquisición de autobuses eléctricos y la expansión de la infraestructura destinada a la electromovilidad (Ñancupil, *et al.*, 2024).

Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050

Uno de los pilares esenciales del Plan Nacional de Descarbonización es la transformación del sistema de transporte, ya que este sector compone la transformación considerable de emisiones de gases de efecto invernadero en Costa Rica.

Como eje inicial de transformación, se contempla el desarrollo de un sistema de movilidad que priorice un transporte público seguro, eficiente y renovable en combinación con opciones de movilidad activa, como caminar y usar bicicletas. La visión propuesta para este sistema de transporte sostenible se centra en cuatro elementos esenciales:

- a) Para 2035, se anticipa que el 30 % de la flota de transporte público sea de cero emisiones y que el tren eléctrico de pasajeros funcione completamente eléctrico.
- b) Mientras tanto, para el año 2050, se prevé un sistema de transporte público integrado, incluyendo buses, taxis y el tren, como la opción principal de movilidad en la Gran Área Metropolitana (GAM), desplazando el uso del automóvil particular. Además, se espera que el 85 % de la flota de transporte público sea cero emisiones y se hayan desarrollado ciudades compactas en las principales áreas urbanas, con un incremento del 10 % en los desplazamientos en modos no motorizados, promoviendo un entorno urbano más saludable y accesible (Gobierno de Costa Rica, 2022).

Este enfoque integral tiene como propósito no solo minimizar la huella de carbono, sino también elevar la calidad de vida, facilitar el acceso a servicios y reducir la congestión del tráfico y contaminación del aire.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

En este apartado, la metodología utilizada resulta fundamental para obtener la información requerida y lograr los objetivos específicos establecidos en el primer capítulo de este estudio. Es crucial resaltar que, en todo análisis, el plan metodológico es la elaboración de una estrategia que debe coincidir con la perspectiva del investigador.

Enfoque de la investigación

La selección del enfoque investigativo no obedece al azar, sino que responde a decisiones reflexivas del investigador en función de la delimitación del problema y los objetivos propuestos. En esta línea, Hernández y Mendoza (2023) sostienen que “la investigación implica una serie de procedimientos sistemáticos, críticos y empíricos utilizados para analizar un fenómeno o problema y aumentar su comprensión” (p. 4). A través del marco metodológico, se clarifican los supuestos teóricos que orientan el estudio y se interpretan los datos desde una perspectiva conceptual que suele traducirse en variables u objetos de análisis observables.

El enfoque de investigación permite definir, desde las etapas iniciales, qué se indagará y cómo se desarrollará el proceso investigativo al precisar técnicas y recursos adecuados para la obtención de información relevante. Este enfoque basado en los principios del método científico resulta indispensable para abordar diversas problemáticas al promover un aprendizaje significativo en el ámbito académico y profesional, además de potenciar las competencias analíticas de la persona investigadora.

Seguidamente, se presentan los distintos tipos de enfoques de investigación con especial atención al enfoque cualitativo adoptado en el presente estudio, cuyo propósito es resaltar su pertinencia y valor aplicado.

Enfoque cuantitativo

Este estudio analiza la viabilidad de implementar unidades eléctricas en el transporte público de la ruta operada por Grupo TUASA entre San José y Alajuela a partir de la percepción de los usuarios y operadores, así como de variables técnicas, económicas y ambientales. La importancia de esta investigación radica en la necesidad de adoptar alternativas sostenibles que contribuyan a la modernización del transporte público, reduzcan la huella de carbono y respondan a las demandas de eficiencia energética en un entorno cada vez más comprometido con la sostenibilidad.

Según Neill y Suárez (2018), la investigación cuantitativa se define como:

Una forma estructurada de recopilar y analizar datos obtenidos de distintas fuentes, lo que implica el uso de herramientas informáticas, estadísticas y matemáticas para obtener resultados (...) se basa en los aspectos numéricos para investigar, analizar y comprobar información y datos (p. 69).

En este sentido, el presente estudio adopta un enfoque cuantitativo que permitirá evaluar, mediante instrumentos estadísticos, factores como el nivel de aceptación del público, costos operativos comparativos, y los beneficios ambientales asociados al uso de unidades eléctricas. Este enfoque posibilita un

análisis objetivo que respalde la toma de decisiones informadas sobre la factibilidad de su implementación en dicha ruta.

Enfoque cualitativo

El enfoque cualitativo se caracteriza por no requerir la recolección de datos mediante mediciones numéricas, sino por centrarse en la interpretación profunda de los fenómenos estudiados. En lugar de partir de una teoría preexistente, este enfoque permite construir el conocimiento a partir de la observación directa y el análisis contextual. Al respecto, Mendoza y Hernández (2023) señalan que los enfoques cualitativos:

Investigan procesos de forma metódica. No obstante, en vez de iniciar con una teoría y luego revisar el mundo real para verificar su respaldo en datos y resultados, el investigador inicia el proceso analizando los hechos y consultando estudios previos al mismo tiempo, con el objetivo de crear una teoría acorde a lo que observa que sucede (p. 9).

Este estudio incorpora un enfoque cualitativo complementado con elementos cuantitativos. Por tanto, recurre a la recopilación de percepciones y opiniones por parte de actores claves, como usuarios del transporte, conductores, personal operativo y representantes institucionales.

Este enfoque permite comprender, en profundidad, experiencias, expectativas, barreras percibidas y motivaciones relacionadas con la posible implementación de unidades eléctricas en la ruta San José - Alajuela. Asimismo, posibilita identificar aspectos subjetivos como aceptación social, percepción del

cambio tecnológico, disposición al cambio y criterios ambientales valorados por los involucrados.

Enfoque mixto

El enfoque mixto combina elementos, tanto del enfoque cuantitativo, como del cualitativo, lo cual permite obtener una comprensión más integral y profunda del fenómeno investigado; por lo tanto, esta integración metodológica aprovecha las fortalezas de ambos enfoques: la capacidad del análisis cuantitativo para ofrecer resultados generalizables y medibles, y la riqueza interpretativa y contextual que aporta el análisis cualitativo. En palabras de Hernández, *et al.* (2023), la investigación mixta se define como:

Un grupo de procedimientos sistemáticos, empíricos y críticos que abarca la recolección y el análisis de datos tanto cuantitativos como cualitativos, además de su integración y discusión conjunta. Esto posibilita hacer inferencias fundamentadas en toda la información recolectada y alcanzar una comprensión más profunda del fenómeno objeto de estudio (p. 10).

En el contexto de este estudio, la aplicación del enfoque mixto permite analizar la viabilidad de implementar unidades eléctricas en la ruta de transporte público operada por Grupo TUASA desde diversas perspectivas. El componente cuantitativo permitirá medir variables, como costos operativos, consumo energético, reducción de emisiones contaminantes, así como aceptación del cambio tecnológico por parte de los usuarios; por otro lado, la investigación cualitativa facilitará la exploración de percepciones y actitudes de los distintos actores involucrados, tales como usuarios del transporte.

La combinación de ambos enfoques no solo enriquece la interpretación de los resultados, sino que también proporciona una base más sólida para la toma de decisiones al aumentar la confiabilidad y pertinencia de las recomendaciones propuestas.

Método de la investigación

En este apartado, se establece el método que permitirá establecer una relación coherente entre sujeto y objeto de estudio. Según Martínez (2018), “los métodos de investigación son procedimientos adecuados para generar conocimientos sobre temas específicos” (p. 104). En esta investigación, se opta por una metodología de campo, pues se recopilarán datos directamente de las fuentes involucradas, principalmente mediante encuestas y entrevistas aplicadas a usuarios y personal operativo de Grupo TUASA.

Método deductivo

Barrón y D'Aquino (2020) afirman que el método deductivo, “consiste en tratar de contrastar hipótesis a partir de la observación de la realidad. De esa manera, se puede establecer concluyentemente la falsedad de una proposición, pero no su verdad” (p. 46).

Este enfoque permite al investigador organizar el proceso de forma lógica y científica a partir de premisas generales, como los principios de movilidad sostenible y eficiencia energética para llegar a conclusiones específicas sobre la aplicabilidad de dichas tecnologías en el caso de la empresa TUASA.

Los instrumentos seleccionados serán aplicados a una muestra representativa de usuarios del servicio, así como al personal operativo y técnico de

la empresa con el fin de obtener información relevante sobre la factibilidad técnica, social y económica de implementar autobuses eléctricos.

Sujeto y fuentes de información

Toda investigación requiere la incorporación de diversas variables que contribuyan a enriquecer la información necesaria para su desarrollo. Entre los elementos fundamentales, se encuentran el sujeto de estudio y las fuentes de información, ya que ambos permiten obtener datos pertinentes, veraces y contextualizados que fortalecen el análisis del fenómeno investigado.

Sujetos de información

Este apartado hace referencia a los participantes, objetos o acontecimientos que desempeñan un papel central durante el desarrollo de la investigación, ya que son quienes aportan información o datos relevantes para el análisis. En este sentido, Barrantes (2010), citado por Espinoza y Peraza (2020), señala que los sujetos “son todas aquellas personas físicas o corporativas que brindan información” (p. 92).

Para el presente estudio, los sujetos directos de la investigación serán usuarios del transporte público de la ruta San José - Alajuela, así como colaboradores y personal operativo de Grupo TUASA involucrados en la gestión, operación y mantenimiento de la ruta en general y su flotilla.

Como sujeto indirecto o complementario se encuentra la empresa operadora del servicio, Transportes Unidos Alajuelenses, quien brinda las condiciones de operación, distancia de la ruta, frecuencia, número de unidades, tiempos de recorrido e infraestructura existente.

Tipo de muestra

En este punto, Hernández y Mendoza (2018) aseveran que una muestra se entiende como “un subgrupo del universo o población del cual se recolectan datos y que debe ser representativo de esta, si se desean generalizar los resultados” (p. 196). En este sentido, el enfoque metodológico adoptado en una investigación establece las directrices y criterios para la selección de la muestra o unidad de estudio, de acuerdo con los objetivos y características del caso analizado.

Para el presente estudio, la muestra estará compuesta por usuarios frecuentes del servicio de transporte público operado por Grupo TUASA en la ruta San José - Alajuela, así como por funcionarios vinculados a la operación y gestión técnica de las unidades. Esta selección permitirá obtener información relevante sobre percepción ciudadana, aceptación de tecnologías limpias y factibilidad operativa de la incorporación de autobuses eléctricos. Dicha situación contribuirá a un análisis integral del tema investigado.

Tabla 1 Tipo muestreo no probabilístico

Convivencia	El investigador selecciona a los miembros de la población de quienes sea más fácil obtener información por su accesibilidad o cercanía.
Criterio	El investigador utiliza su juicio para seleccionar a los miembros de la población que puedan aportar información relevante y precisa con base en características específicas.
Cuota	El investigador localiza y entrevista a un número predeterminado de sujetos en cada una de diversas categorías (por ejemplo, conductores, usuarios, técnicos).

Nota: Kotler y Armstrong, 2017, p. 113

El muestreo corresponde a una parte específica de la población que se desea estudiar. Por lo general, se determina mediante una fórmula cuando la población es amplia. No obstante, en esta investigación, no es necesario aplicar un muestreo estadístico, pues la población objetivo es reducida y manejable en su totalidad.

En el presente estudio enfocado en la viabilidad de implementar unidades eléctricas en la ruta de transporte público San José - Alajuela operada por Grupo TUASA durante el primer semestre del 2025, se utiliza un muestreo no probabilístico. Por esta razón, se opta por un muestreo por conveniencia, el cual permite seleccionar a los participantes que resultan más accesibles y relevantes para los fines de la investigación.

Por ende, se trabajará directamente con un grupo de 14 colaboradores de la empresa TUASA (autobuseros), así como con 100 usuarios frecuentes del servicio de transporte, los cuales podrán aportar información valiosa sobre la percepción, aceptación y viabilidad del uso de autobuses eléctricos en dicha ruta.

Fuentes de información

Dentro de una investigación, las fuentes de información constituyen herramientas claves para sustentar y desarrollar el estudio, ya que permiten acceder a datos y conocimientos pertinentes. Estas pueden presentarse en diversos formatos, como documentos físicos, medios digitales, contenidos audiovisuales, plataformas en línea o incluso construcciones sociales como ideas y creencias. Tal como lo explican Hernández y Mendoza (2018), “las fuentes representan los canales iniciales a partir de los cuales surgen las preguntas de investigación y se estructura

el marco teórico y contextual” (p. 25). En el caso del presente estudio, se utilizarán fuentes primarias y fuentes secundarias.

Las fuentes primarias estarán conformadas por los datos recolectados mediante encuestas dirigidas tanto a los usuarios frecuentes y una entrevista al personal operativo de Grupo TUASA, quienes aportarán sus percepciones sobre la viabilidad y aceptación de los autobuses eléctricos en la ruta San José - Alajuela.

Por otro lado, las fuentes secundarias incluirán: documentación técnica de fabricantes de autobuses eléctricos (autonomía, consumo, costos, requerimientos de carga), estudios científicos, marcos legales vigentes, informes gubernamentales y literatura especializada en sostenibilidad, transporte limpio y energías renovables aplicadas a la movilidad urbana.

Bases de datos oficiales: ARESEP (tarifas, informes técnicos), MOPT (infraestructura vial, rutas), MINAE o Dirección de Cambio Climático (planes nacionales).

Planes y políticas nacionales: Plan Nacional de Descarbonización, Ley de incentivos a Vehículos Eléctricos (Ley 9518).

Informes de organismos internacionales: como el BID, CEPAL, ONU Medio Ambiente, o la GIZ.

Variables o Unidades de Análisis

Dentro de toda investigación, las variables constituyen componentes fundamentales, pues orientan el estudio hacia los aspectos esenciales del fenómeno que se desea comprender. Estas se definen a partir de referentes teóricos

relevantes, lo cual permite ubicarlas adecuadamente dentro del marco conceptual de la investigación.

Cada variable no solo requiere una definición conceptual que delimite su significado desde la teoría, sino también una definición operativa, la cual especifique cómo será observada, medida o evaluada en el contexto específico del estudio. En esta línea, Hernández, *et al.* (2018) indican que las variables son “las propiedades medidas que forman parte de las hipótesis que se pretenden describir” (p. 319). Ello subraya su importancia en la formulación y en el análisis de la investigación.

Tabla 2 Definición, operacionalización e instrumentalización de las variables de la investigación

Dimensión	Variable	Indicador	Medida	Fuente de Datos	Instrumento de Recolección
Técnica	Autonomía de la unidad eléctrica	Kilómetros recorridos por carga completa	km	Fichas técnicas de fabricantes	Revisión documental
Técnica	Tiempo de recarga	Minutos promedio para recargar batería	min	Fichas técnicas / pruebas piloto	Revisión documental
Técnica	Disponibilidad de infraestructura de carga	Número de puntos de carga disponibles en la ruta	cantidad	Observación directa / informes institucionales	Lista de verificación
Económica	Costo total de propiedad (TCO)	Costo total por unidad durante su vida útil	USD	Análisis documental / entrevistas	Matriz de costos
Económica	Costos de operación	Costo mensual promedio de operación	USD	Entrevistas / simulaciones financieras	Entrevistas semiestructuradas
Económica	Retorno de inversión	Número de años estimado para recuperar inversión	años	Modelos financieros / entrevistas	Modelo financiero
Ambiental	Emisiones de CO ₂	Gramos de CO ₂ por km recorrido	g/km	Literatura técnica / simulaciones	Simulación comparativa
Ambiental	Emisiones de material particulado	Concentración de PM10 emitido por unidad	µg/m ³	Estudios ambientales comparativos	Análisis documental
Ambiental	Nivel de ruido	Decibeles generados en operación	dB	Mediciones en campo / literatura técnica	Medición sonora / registros
Principal	Viabilidad de implementación	Valoración integral de la viabilidad (técnica, económica, ambiental)	Escala cualitativa	Síntesis de resultados por dimensión	Cuadro de síntesis

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Instrumentos y técnicas de investigación

Los instrumentos de investigación son recursos empleados por el investigador para recopilar datos cualitativos y cuantitativos, lo cual facilita la recolección de información relevante que permita cumplir con los objetivos planteados. Por lo tanto, estas herramientas son esenciales para el estudio de las variables, ya que posibilitan al investigador obtener y examinar datos de manera estructurada. Dentro de este contexto, se utilizan métodos específicos, como la encuesta escrita, donde el cuestionario actúa como el principal mecanismo para recolectar información.

Revisión documental

Instrumento: Ficha de extracción de datos secundarios

Para sistematizar información técnica, económica y ambiental de fuentes como artículos científicos, informes de organismos internacionales, normativas nacionales, fichas técnicas de buses eléctricos, etc.

Entrevistas semiestructuradas

Instrumento: Guía de entrevista

Dirigida al personal operativo de Grupo TUASA. Incluye preguntas abiertas para explorar experiencias, proyecciones, necesidades de infraestructura, percepción de barreras, contaminación, entre otros.

Observación directa

Instrumento: Lista de verificación de condiciones operativas e infraestructura

Para registrar características físicas de la ruta, posibles ubicaciones para infraestructura de recarga, condiciones generales de la flota actual, flujo vehicular y tiempos de recorrido.

Análisis económico y técnico

Instrumento: Tabla comparativa de costos

Utilizadas en la comparación de los buses diésel vs. eléctricos considerando, costos de adquisición, consumo energético, costos de mantenimiento y retornos de inversión.

Encuesta

Instrumento: encuesta objetiva

Realizada a usuarios de la ruta para apreciar el impacto de cambio en conceptos como percepción de ruido, contaminación, comodidad, disposición y conocimiento de cambio.

CAPÍTULO IV. RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos constituye un componente fundamental del diseño de investigación, ya que representa su expresión operativa. Esto implica la definición precisa de procedimientos, lugares y condiciones bajo las cuales se recopilará la información. En este estudio, los métodos de recolección de datos tienen como objetivo principal obtener información que permitan interpretar la realidad observada, considerando cada evento y momento dentro del proceso investigativo. Por lo tanto, se requiere el uso de instrumentos adecuados que logren reflejar fielmente los hechos tal como ocurren de acuerdo con el enfoque adoptado.

Es necesario manifestar que la información recolectada de las poblaciones objeto de estudio será analizada mediante estadística descriptiva al utilizar el programa Microsoft Excel para su procesamiento y presentación a través de tablas y gráficos. Asimismo, se aplicarán los principios de confiabilidad y objetividad para garantizar la validez de los datos obtenidos. Como lo señala Barrantes (2014), “los gráficos de barras constituyen uno de los tipos más simples y quizás más usados; resultan de especial utilidad en la presentación de series cualitativas, geográficas, discretas y cronológicas” (p. 252).

La interpretación de los datos se realizará por variable y por cada pregunta formulada en el instrumento aplicado. Asimismo, el análisis consistirá en sistematizar la información en cuadros al considerar la frecuencia de las respuestas para cada opción, además de elaborarse gráficos con base en esos cuadros, apoyándose en conceptos básicos de estadística.

Análisis del entorno

El entorno del transporte público en Costa Rica, especialmente en rutas de alta demanda como San José - Alajuela, se encuentra en un proceso de transformación impulsado por la necesidad de modernizar la flota vehicular, reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia del servicio. Factores como el crecimiento poblacional, aumento del parque vehicular, problemas de congestión vial y las políticas gubernamentales orientadas a la sostenibilidad han generado un escenario propicio para considerar alternativas como la movilidad eléctrica.

Análisis descriptivo de la entrevista aplicada a los autobuseros del transporte público de la ruta San José - Alajuela (Grupo TUASA).

Mediante la aplicación de entrevistas y el análisis de los resultados obtenidos, se busca evaluar la viabilidad de implementar unidades eléctricas en el transporte público operado por Grupo TUASA en la ruta San José - Alajuela, como una estrategia que contribuya a una gestión más eficiente, sostenible y moderna del servicio brindado por la empresa.

Entrevista semi estructurada. El instrumento fue aplicado en el período comprendido entre 21 de mayo y 10 de junio de 2025; durante este tiempo, un total de 14 conductores de autobús participaron en la encuesta, de los cuales el 10% correspondió a mujeres y el 90% a hombres. Para su distribución, se facilitó un enlace mediante los correos electrónicos proporcionados por los colaboradores registrados en la base de datos de la institución. Ello permitió que la encuesta fuera autoadministrada de manera eficiente.

A partir de las respuestas brindadas por los encuestados, se logró determinar lo siguiente:

Tabla 3 Implementación de buses eléctricos

Ítem	Respuestas de las fuentes
1. ¿Qué opinión tiene usted sobre la idea de implementar buses eléctricos en la ruta San José - Alajuela?	La viabilidad de implementar unidades eléctricas dependerá de los resultados de la investigación, especialmente en relación con su impacto ambiental. Si se garantiza un adecuado manejo y procesamiento de las baterías una vez finalice su vida útil, y los resultados son positivos, puede considerarse una alternativa favorable. En general, representa una opción útil y beneficiosa al contribuir con la reducción de la contaminación. Ayudará mucho a descarbonización. Muy buena idea para ayudar al medio ambiente.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

El análisis de las respuestas evidencia una tendencia favorable hacia la adopción de tecnologías limpias en el transporte público al reflejar una conciencia ambiental creciente por parte de la población. Por lo tanto, la implementación de buses eléctricos en rutas de alto tránsito como San José - Alajuela fue percibida como una medida coherente con los objetivos nacionales de sostenibilidad al asociarse con beneficios como la mejora en la calidad del aire y la reducción de la huella de carbono.

Sin embargo, también emergen criterios de evaluación crítica, los cuales destacan la necesidad de considerar aspectos técnicos y ambientales asociados a su implementación, tal como la gestión adecuada de los residuos tecnológicos.

Tabla 4 Beneficios de los buses eléctricos

Ítem	Respuestas de las fuentes
2. Desde su experiencia diaria como autobusero, ¿cuáles cree que serían los principales beneficios de utilizar buses eléctricos en esta ruta?	Menos contaminación. Menos consumo de hidrocarburos. Menos contaminación, un precio menor en el pasaje. Reducción a la contaminación sonora y atmosférica, confort, economía y una mejor eficiencia gracias a la tecnología que implementan en esos servicios. Únicamente se quita la restricción.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Desde la perspectiva de los operadores del transporte, los beneficios percibidos de incorporar buses eléctricos en la ruta San José - Alajuela se centraron en mejoras, tanto ambientales, como operativas. Se identificó una valoración positiva hacia la reducción de impactos contaminantes, tanto a nivel sonoro, como atmosférico, lo cual sugiere una alta sensibilidad hacia las condiciones del entorno en que realizan su labor diaria. Asimismo, se reconoce el potencial de esta tecnología para mejorar la eficiencia del servicio y generar posibles beneficios económicos, como el ahorro en combustible o la eventual disminución del costo del pasaje para los usuarios.

Estas percepciones revelan que quienes operan directamente los autobuses no solo comprendían las implicaciones técnicas del cambio, sino que también reconocieron su impacto en la calidad del servicio y en la experiencia del usuario.

Tabla 5 Retos o dificultades al incorporar unidades eléctricas

Ítem	Respuestas de las fuentes
3. ¿Cuáles considera que serían los principales retos o dificultades al incorporar unidades eléctricas en la operación diaria?	Costos y presupuesto. Carga eléctrica para los buses y cuál será la inversión para ellas, además de cómo van a obtener dicha electricidad. El mantenimiento no lo hace cualquier mecánico. Ante una emergencia por el mal manejo del automotor y el manejo de las baterías de litio. Recargar los autobuses después de la jornada laboral, ya que son bastantes unidades.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Los resultados reflejaron que los principales retos identificados por los actores operativos del transporte ante la incorporación de unidades eléctricas se relacionaban con factores técnicos, económicos y logísticos. Existe una preocupación destacada por los altos costos iniciales asociados a la adquisición, infraestructura de carga y mantenimiento especializado, lo cual representa una barrera significativa para su implementación. Asimismo, se señaló la limitada disponibilidad de personal capacitado para el manejo y reparación de esta tecnología, en especial, en lo relacionado con los sistemas eléctricos y las baterías de litio, lo cual podría afectar la continuidad y seguridad del servicio.

Otro desafío recurrente es la logística de recarga de múltiples unidades, pues exige una planificación adecuada en cuanto a tiempos, espacios y disponibilidad energética.

Tabla 6 Infraestructura

Ítem	Respuestas de las fuentes
4. ¿Cree que la infraestructura actual (paradas, estaciones, talleres) está preparada para recibir buses eléctricos? ¿Por qué?	No, faltan mejoras en infraestructura. Creo que podrían implementar cursos donde capaciten talleres. No, porque es tecnología que aún no se implementa, pero sí se puede lograr una buena infraestructura. Me parece que hay carencia en ciertos repuestos en automotores chinos, paradas en pésimas ubicaciones y, en forma adicional, la mayoría de los choferes no ingresan a los lugares donde los usuarios abordan el bus. En estos momentos no, pero la empresa debe encargarse de actualizar, tanto al personal, como a su infraestructura.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

El análisis de las opiniones reveló un consenso entre los participantes en cuanto a que la infraestructura actual no estaba adecuadamente preparada para la incorporación de buses eléctricos. En ese sentido, se identificaron carencias, tanto físicas, como operativas, incluyendo ubicación deficiente de las paradas, falta de talleres especializados y escasa disponibilidad de repuestos, en especial para vehículos de origen extranjero.

Conjuntamente, se evidencia una percepción de desactualización en la formación del personal, lo cual representa un desafío adicional para la adaptación del sistema de transporte a las nuevas tecnologías; no obstante, algunas respuestas reflejaron una visión constructiva y abierta al cambio al destacar que, si bien actualmente no existían las condiciones ideales, sería posible alcanzarlas mediante inversiones adecuadas, reubicación de infraestructura clave y procesos de capacitación técnica.

Tabla 7 Capacitación o información por parte de la empresa

Ítem	Respuestas de las fuentes
5. ¿Ha recibido alguna capacitación o información por parte de la empresa sobre el uso de buses eléctricos? ¿Le interesaría recibirla?	No. No he recibido y sí me interesaría. No, y sí me gustaría recibirla. En algún momento, vamos a tener que hacer un cambio y debemos estar preparados lo mejor posible para cuando llegue ese momento. Creo que la empresa ya debería hacer un estudio sobre los pros y los contras que eso implica, y poner manos a la obra. Sí, claro, he recibido por parte de Siemens.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Los resultados evidenciaron una limitada difusión de información y capacitación formal por parte de las empresas hacia el personal sobre el uso de buses eléctricos, lo cual representa una debilidad importante en el proceso de transición hacia un sistema de transporte sostenible. Aunque la mayoría de los participantes no había recibido formación al respecto, existía una clara disposición e interés por adquirir conocimientos sobre esta tecnología. Por tanto, se refleja una actitud proactiva por parte de los trabajadores ante los cambios que se avecinan.

En ese sentido, reconocieron que la capacitación era un componente clave para facilitar la adaptación del recurso humano y garantizar una operación segura y eficiente. Si bien se mencionó una experiencia aislada de capacitación, esta se percibió como una excepción y no como parte de una estrategia sistemática.

Tabla 8 Rendimiento de los buses eléctricos

Ítem	Respuestas de las fuentes
6. ¿Considera que el rendimiento de los buses eléctricos podría ajustarse a las exigencias de la ruta San José - Alajuela, especialmente en horarios pico?	Sí. Se debe hacer un estudio primero para ver durabilidad contra tiempo. Según el rendimiento de las baterías. Uno esperaría que, si traen unidades nuevas al país, se hayan contemplado ese tipo de situaciones, sino más bien ocasionaría más congestión por buses descargados. De acuerdo con las especificaciones de los buses, sería un tema importante por valorar. Sí, completamente.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las opiniones recogidas evidenciaron una disposición moderadamente positiva hacia la posibilidad de que los buses eléctricos se ajusten a las exigencias operativas de la ruta San José - Alajuela, particularmente en horarios de alta demanda. No obstante, algunos participantes expresaron confianza en que estas unidades podían cumplir con los requerimientos y también se identificaron reservas importantes que apuntaban a la necesidad de estudios técnicos previos. Por consiguiente, se percibió que el rendimiento de los vehículos dependerá en gran medida de variables como durabilidad de las baterías, capacidad de carga y

planificación adecuada en relación con los tiempos de operación. Esta visión crítica y preventiva refleja una preocupación legítima por evitar fallos operativos que podrían agravar la congestión vehicular si los buses no cumplen con las exigencias del servicio.

Tabla 9 Mantenimiento de los buses eléctricos

Ítem	Respuestas de las fuentes
7. ¿Qué tan viable cree que es el mantenimiento de los buses eléctricos en comparación con los buses tradicionales?	Debe capacitarse su uso preventivo y correctivo para el mantenimiento adecuado. No muy viable. Según el costo de algunos accesorios. Es complicado responder a eso, ya que, en estos momentos, no contamos con buses eléctricos. Sin embargo, creo que, con personal calificado y un taller actualizado y acondicionado para estas unidades, se les podría brindar un buen mantenimiento. Es muy económico.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las respuestas reflejaron percepciones diversas con respecto a la viabilidad del mantenimiento de buses eléctricos en comparación con los tradicionales, lo cual evidencia, tanto incertidumbre, como expectativas positivas condicionadas.

Si bien algunos consideraron que el mantenimiento podría ser más económico o efectivo, su viabilidad estaba sujeta a factores claves como la capacitación técnica del personal, disponibilidad de repuestos y adecuación de los talleres para atender las especificidades de esta tecnología. Por otra parte, la falta de experiencia directa con este tipo de unidades genera una percepción de

incertidumbre, pues se indicó que aún no se contaba con suficiente información práctica para emitir un juicio concluyente. A pesar de la disposición a adaptarse mediante formación técnica especializada y actualización de infraestructura, se sugirió que, con la inversión adecuada, el mantenimiento podía llegar a ser sostenible.

Tabla 10 Reacción de los usuarios

Ítem	Respuestas de las fuentes
8. ¿Cómo cree que reaccionaría el usuario (pasajero) habitual ante un cambio a buses eléctricos?	Normal. Mientras que le den el servicio, les daría igual. Sería mejor por tema de contaminación, por el ruido del bus y los gases. No se percibe el cambio en el costo, sino en el ruido que disminuye. En mi opinión, siempre y cuando los autobuses cumplan con sus horarios y sean confortables, serán bien recibidos. Unos bien, otros a los 10 min ya los tendrán rayados y destruidos de alguna manera, lastimosamente. Muy buena debido a la actualización.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las opiniones recopiladas sugirieron que la reacción del usuario habitual frente a la implementación de buses eléctricos era, en general, neutral o positiva, siempre que el servicio mantenga su calidad, puntualidad y comodidad. Se percibe que el pasajero promedio priorizó aspectos funcionales del transporte, como frecuencia y confort, por encima de factores técnicos como el tipo de motor. Sin embargo, se reconocieron ventajas apreciables desde la experiencia del usuario,

como disminución del ruido y de las emisiones contaminantes, lo cual podría generar una percepción favorable hacia el cambio. A pesar de ello, también se advirtieron posibles reacciones negativas asociadas a comportamientos sociales, como vandalismo o falta de cultura ciudadana. Dicha situación sugiere que el éxito del cambio tecnológico dependerá no solo de factores técnicos, sino también de estrategias complementarias de educación y sensibilización.

Tabla 11 Implementar buses eléctricos en la flota actual

Ítem	Respuestas de las fuentes
9. En su opinión, ¿cuáles condiciones mínimas deberían garantizarse antes de implementar buses eléctricos en la flota actual?	Capacitación. Buen mantenimiento. Aumentar la flotilla y comodidad para el usuario. Mano de obra para mantenimientos y estaciones de carga más abundantes. Precio, calidad y servicio y actualizar infraestructura y asegurarse de poder brindar un buen mantenimiento. Una infraestructura que soporte esta flotilla. Más cantidad de buses para garantizar el buen servicio. Cargadores en las terminales.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las condiciones mínimas para implementar una flota de buses eléctricos no solo deben centrarse en la incorporación de los vehículos en sí, sino en el fortalecimiento de todo el ecosistema operativo que los respalda. Por lo tanto, es indispensable asegurar la existencia de una infraestructura adecuada que permita una operación continua y eficiente, incluyendo terminales adaptadas, estaciones de carga suficientes y un sistema logístico que garantice la disponibilidad energética. Asimismo, resulta crucial contar con personal debidamente capacitado en aspectos

técnicos, operativos y de mantenimiento, lo cual implica inversión en formación especializada y actualización de procesos internos. Por lo tanto, dicha gestión debe considerar la planificación de la capacidad de la flota para satisfacer la demanda sin comprometer la calidad del servicio.

Tabla 12 Incorporación de tecnología más sostenible

Ítem	Respuestas de las fuentes
10. ¿Desea agregar algún comentario o sugerencia sobre el futuro del transporte público y la incorporación de tecnología más sostenible como la eléctrica?	No. Puede hacerse como valor agregado y no en reemplazo. Se debe valorar el rendimiento de un autobús en diésel a uno eléctrico. El tiempo de recarga por las presas. Implementar la movilidad vial en todos los servicios públicos en Costa Rica. Incorporar líneas de metro y tranvías. Una infraestructura que soporte esta flotilla. Es muy buena para el tema de ayuda al medio ambiente. N/A.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las observaciones finales recopiladas reflejaron una variedad de perspectivas sobre el futuro del transporte público y la incorporación de tecnologías sostenibles, destacándose, tanto el potencial ambiental, como los desafíos operativos. Asimismo, se identificó una apertura general hacia la modernización del sistema de transporte con énfasis en la necesidad de integrar soluciones más limpias como los buses eléctricos.

Sin embargo, también se plantearon consideraciones relevantes sobre el rendimiento comparativo entre tecnologías existentes y emergentes, así como el impacto que podrían tener factores como tiempos de recarga y congestión vial en la eficiencia del servicio.

De esta manera, algunas respuestas sugirieron una visión más amplia e innovadora al proponer la diversificación del sistema mediante la inclusión de opciones como tranvías o líneas de metro. Ello evidencia un interés por repensar el transporte público desde una perspectiva integral y multimodal.

Tabla 13 Impacto ambiental

Ítem	Respuestas de las fuentes
11. ¿Cómo percibe usted el impacto ambiental generado actualmente por los autobuses tradicionales en la ruta San José - Alajuela, especialmente en cuanto a emisiones contaminantes como el CO ₂ ? Explique según su experiencia diaria como conductor y lo que observa en el entorno.	Mucha contaminación ambiental y sonora. Las revisiones técnicas es muy fácil evadirlas e igual contaminar. Hace falta conciencia ambiental Pésima, los buses contaminan mucho. Actualmente, las unidades están en mal estado. Las revisiones técnicas es muy fácil evadirlas e igual contaminar. Hace falta conciencia ambiental. Actualmente, los autobuses generan un alto nivel de contaminación debido al uso de motores diésel, los cuales emiten mayores cantidades de gases contaminantes y producen contaminación sonora. Considerando la gran cantidad de unidades que circulan diariamente en todo el país, el impacto ambiental de este medio de transporte es considerable. Unidades viejas con el mínimo mantenimiento. La contaminación es muy grande. En los clientes, se nota el descontento.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

El análisis de las percepciones recogidas reveló una evaluación crítica y consistente sobre el impacto ambiental negativo que actualmente generaban los autobuses tradicionales en la ruta San José - Alajuela. Desde la experiencia directa de los conductores, se reconoció un alto nivel de contaminación, tanto atmosférica, como sonora, lo cual se atribuía principalmente al uso prolongado de unidades con motores diésel, muchas de ellas en condiciones mecánicas deficientes y con mantenimiento limitado. Este panorama refleja no solo una problemática técnica, sino también una debilidad estructural en la fiscalización del parque vehicular y en la cultura de cumplimiento de las normativas ambientales; a su vez, se percibió una desconexión entre las regulaciones existentes y su aplicación efectiva, lo cual incrementa el deterioro ambiental y afecta directamente la calidad del servicio.

Tabla 14 Cambios ambientales

Ítem	Respuestas de las fuentes
12. ¿Cuáles cambios ambientales cree usted que podrían notarse si se reemplazaran progresivamente los autobuses tradicionales por unidades eléctricas? Considere aspectos como aire, ruido y calidad de vida en la ciudad.	Menos contaminación ambiental y sonora. Menos emisiones de CO2 es positivo. Puede mejorar, pero, cuando se desechen las baterías, se contamina más, será mejor cambiar a un sistema de gas. Actualmente, las unidades están en mal estado. Las revisiones técnicas es muy fácil evadirlas e igual contaminar. Hace falta conciencia ambiental. Si bien el uso de autobuses eléctricos reduce el ruido y la contaminación a corto plazo, a largo plazo, podría generarse un nuevo tipo de contaminación asociada a la fabricación, uso y disposición final de las baterías. Se vería una mejora indiscutible ante la calidad de vida de los ciudadanos. Las personas residentes en la capital

serían beneficiadas, pues ahí se manejan altas cantidades de contaminación.

Literalmente, solo mejoras pueden venir del transporte público eléctrico.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las percepciones recabadas reflejaron una expectativa mayoritariamente positiva frente a los posibles efectos ambientales derivados de una transición hacia autobuses eléctricos, especialmente en referente a la calidad del aire, reducción del ruido urbano y mejora en la calidad de vida de la población. Por ende, se reconoció que el reemplazo progresivo de unidades tradicionales podría traducirse en beneficios tangibles para entornos urbanos altamente contaminados, como el Gran Área Metropolitana; no obstante, también emergieron consideraciones críticas que señalaron la necesidad de abordar los posibles impactos ambientales asociados al ciclo de vida de las baterías, especialmente en cuanto a su fabricación y disposición final. Lo anterior evidencia una comprensión más profunda del tema, donde los beneficios inmediatos no opacan la importancia de una gestión responsable a largo plazo.

Tabla 15 Buses eléctricos a la construcción de un sistema de transporte

Ítem	Respuestas de las fuentes
13. En su opinión, ¿cómo podría contribuir el uso de buses eléctricos a la construcción de un sistema de transporte más sostenible y	Puede mejorar el ambiente y tal vez menos cansado para los choferes, pero se debe tomar en cuenta la capacitación. Podría mitigar contaminación, gastos operativos, daños o averías, retrasos en el servicio y afectación a terceros.

respetuoso con el ambiente?	Explicar desde su perspectiva profesional y cualquier conocimiento que tenga sobre el tema.	Implementarlo sería un gran avance para nuestro país, el cual es conocido por ser un país verde. Realmente, en nada porque, para generar cada batería de litio, se destruye la naturaleza. Es importante la descarbonización. Un daño en el sistema de baterías o explosión es casi nulo.
-----------------------------	---	---

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Las respuestas reflejaron una percepción mayoritariamente positiva con respecto al aporte de los buses eléctricos a la sostenibilidad del transporte público. Por ende, se destacó su potencial para reducir la contaminación ambiental, optimizar costos operativos y mejorar las condiciones laborales, como la reducción de la fatiga en los conductores.

De la misma manera, se valoró la alineación de esta tecnología con los compromisos nacionales de descarbonización y la imagen ecológica del país. Sin embargo, también emergieron posturas críticas que llamaron a considerar los impactos ambientales asociados a la producción y disposición de las baterías de litio, evidenciando la necesidad de abordar la sostenibilidad desde una perspectiva integral que contemple todo el ciclo de vida del vehículo eléctrico.

Análisis descriptivo de la encuesta aplicada a los usuarios del transporte público de la ruta San José - Alajuela (Grupo TUASA)

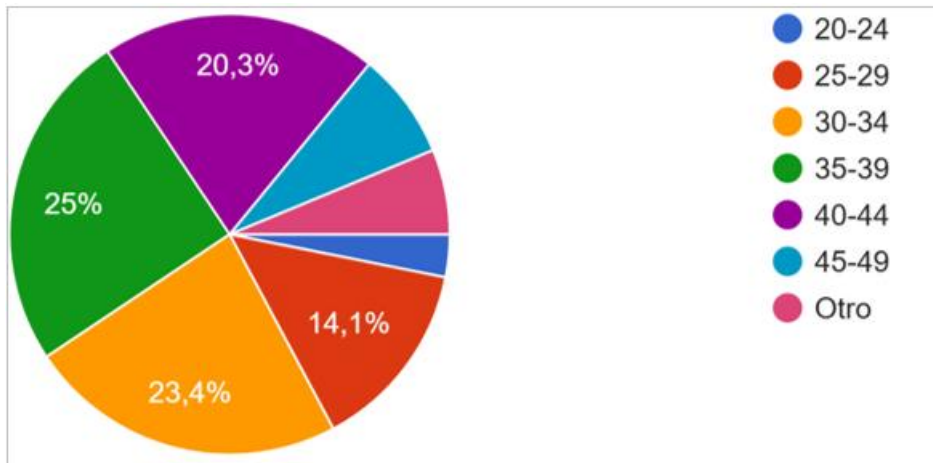
Encuesta. Con el propósito de evaluar la viabilidad de implementar unidades eléctricas en el transporte público operado por Grupo TUASA, se llevó a cabo una encuesta dirigida a los usuarios del servicio en la ruta San José - Alajuela. Esta iniciativa busca valorar si dicha transformación tecnológica puede contribuir a una gestión más eficiente, sostenible y moderna del transporte público brindado por la empresa.

Para el levantamiento de la información, se utilizó una encuesta aplicada en el periodo comprendido entre 21 de mayo y 10 de junio de 2025. Durante este tiempo, un total de 100 usuarios participaron como informantes claves en el proceso con una composición de género del 42,2% mujeres y 50,8% hombres.

La distribución del instrumento se realizó a través de un enlace enviado por correo electrónico a los colaboradores registrados en la base de datos de la institución, lo cual permitió una administración ágil y segura de la encuesta.

A partir de las respuestas recopiladas, fue posible identificar percepciones, necesidades y niveles de aceptación con respecto a la posible implementación de autobuses eléctricos. Dicha situación aporta insumos valiosos para la toma de decisiones estratégicas en el contexto del transporte público interurbano entre San José y Alajuela.

Gráfico 1 Rango de edad



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

En el análisis de los rangos de edad de los usuarios encuestados del transporte público operado por Grupo TUASA en la ruta San José - Alajuela, se observó una mayor concentración de personas en el grupo etario de 35 a 39 años, lo cual representó el 25% del total de encuestados.

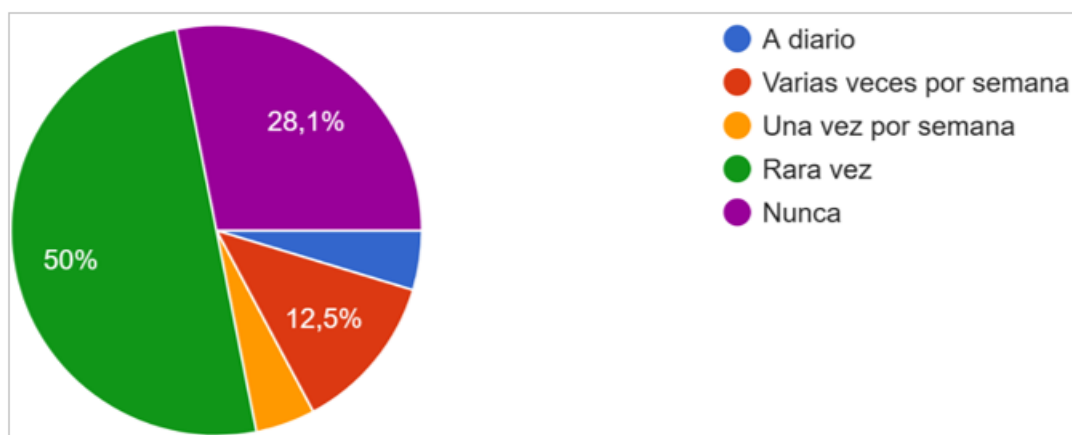
Le siguieron los grupos de 30 a 34 años con un 23,4% y de 40 a 44 años con un 20,3%, lo cual evidencia que la mayoría de los usuarios activos del servicio corresponde a personas adultas jóvenes y de mediana edad, que, probablemente, hacen uso frecuente del transporte público por motivos laborales o académicos.

Por otro lado, los grupos de 25 a 29 años (14,1%) y de 45 a 49 años (7,8%) presentaron porcentajes moderados, mientras que los usuarios más jóvenes (20 a 24 años) representaron solo el 3,1%. Posteriormente, un 6,3% indicó pertenecer a otro rango de edad no especificado.

Estos resultados permiten inferir que la planificación e implementación de mejoras, como la incorporación de unidades eléctricas, debería considerar

necesidades y hábitos de una población predominantemente adulta, lo cual puede influir, tanto en la aceptación del cambio, como en la estrategia de comunicación y sensibilización hacia una movilidad más sostenible.

Gráfico 2 Frecuencia de utilización del transporte público



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

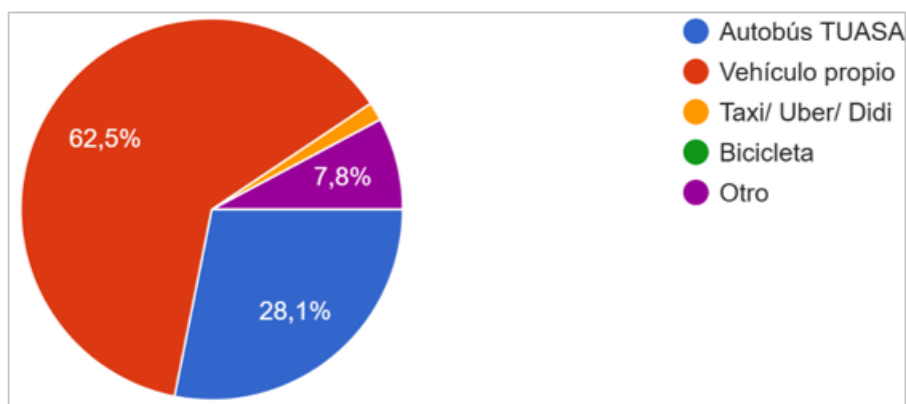
Ante la consulta: ¿Con cuánta frecuencia utiliza usted el transporte público en la ruta San José - Alajuela?, se identificó que el 50% de los encuestados indicó utilizar este medio raras veces, seguido por un 28,1% que manifestó nunca hacer uso del servicio.

Dichos datos revelaron que más de tres cuartas partes de la muestra no recurría al transporte público en forma habitual, lo cual puede estar relacionado con factores como disponibilidad de medios de transporte alternativos, horarios laborales o percepciones sobre la calidad del servicio.

En contraste, solo un 12,5% señaló utilizarlo varias veces por semana, mientras un 4,7% lo hacía a diario y otro 4,7% una vez por semana; dicho patrón de uso poco frecuente sugiere que, si bien el transporte público es una opción

disponible, no constituye la principal forma de movilidad para una gran parte de los participantes.

Gráfico 3 Importancia del medio de transporte



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

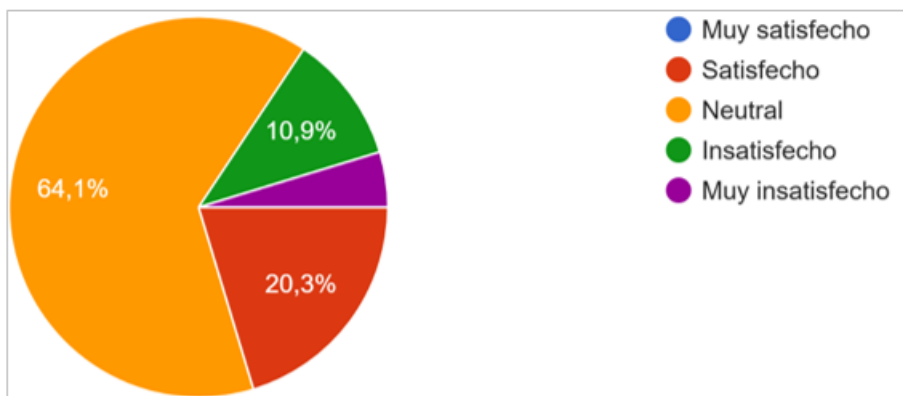
En respuesta a la pregunta: ¿Cuál es su medio de transporte principal para movilizarse entre San José y Alajuela?, los datos evidenciaron que una amplia mayoría (62,5%) de los encuestados utilizaba el vehículo propio como su principal medio de desplazamiento en dicha ruta; esta tendencia revela una marcada dependencia del transporte privado posiblemente asociada a factores como flexibilidad de horarios, percepción de mayor comodidad y eficiencia, así como limitaciones percibidas en la calidad del transporte público.

En segundo lugar, el 28,1% de los participantes reportó utilizar el autobús de Grupo TUASA, lo cual indica una presencia relevante, aunque no predominante del transporte público en la dinámica de movilidad entre ambas ciudades.

Por otro lado, opciones como servicios de transporte colaborativo o tradicional (Uber, Didi, taxi) apenas alcanzaron un 1,6%, mientras que un 7,8%

mencionó emplear otros medios de transporte sin precisar cuáles; en ese sentido, llama la atención que la bicicleta no fue señalada por ninguno de los encuestados, lo cual puede estar relacionado con distancia, condiciones de infraestructura vial o percepción de inseguridad para el ciclismo urbano.

Gráfico 4 Satisfacción del servicio



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

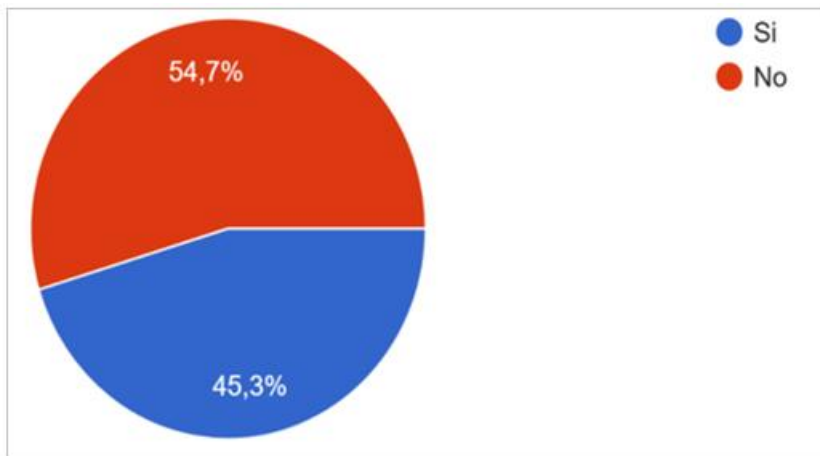
En relación con la pregunta: ¿Está usted satisfecho(a) con el servicio actual brindado por Grupo TUASA?, los resultados evidenciaron que la mayoría de los encuestados 64,1% adoptó una postura neutral, lo cual podría interpretarse como una señal de indiferencia, falta de expectativas claras o, incluso, desconocimiento sobre los estándares del servicio. Este hallazgo resulta especialmente relevante, pues un nivel tan alto de neutralidad podría indicar una oportunidad para fortalecer la percepción de valor agregado en el servicio de transporte público.

Por su parte, un 20,3% manifestó sentirse satisfecho, mientras que solo un 4,7% expresó estar muy satisfecho, lo cual, en conjunto, suma apenas un 25% de usuarios con una percepción positiva del servicio.

En contraste, un 10,9% indicó estar insatisfecho y un 4,7% muy insatisfecho, revelando que cerca del 16% de los participantes presentó algún grado de inconformidad con la oferta actual.

Estos resultados permiten concluir que existe un margen importante de mejora en aspectos como puntualidad, comodidad, frecuencia, atención al usuario y condiciones de las unidades.

Gráfico 5 Familiarización del concepto



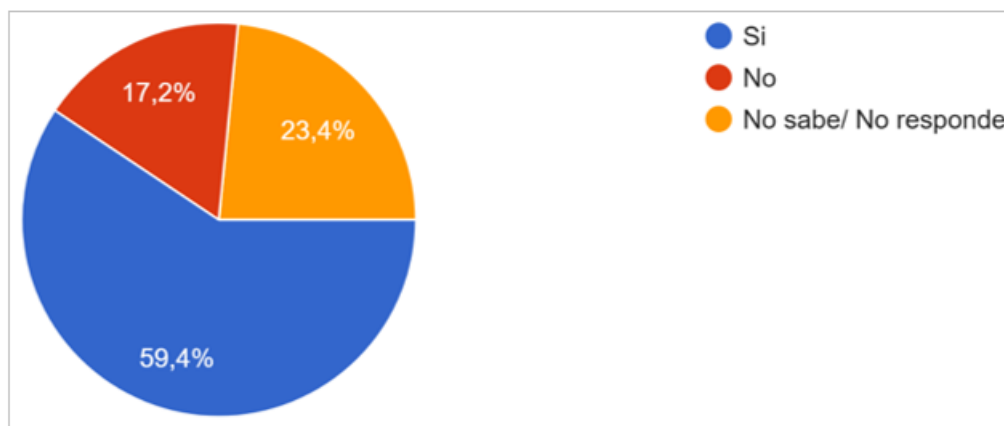
Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

En respuesta a la pregunta: ¿Está familiarizado(a) con el concepto de autobuses eléctricos?, los resultados revelaron que el 54,7% de los encuestados indicó no estar familiarizado con el concepto, mientras que el 45,3% afirmó que sí lo conocía.

Dichos resultados reflejaron una división significativa en el nivel de conocimiento de los usuarios respecto de esta tecnología con una ligera mayoría que manifestó desconocimiento. Por lo tanto, dicha familiaridad representa un desafío importante para una eventual implementación de autobuses eléctricos por

parte de Grupo TUASA, ya que evidencia la necesidad de realizar campañas informativas y educativas que permitan socializar los beneficios, funcionamiento y características de este tipo de unidades.

Gráfico 6 Implementación de unidades eléctricas



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

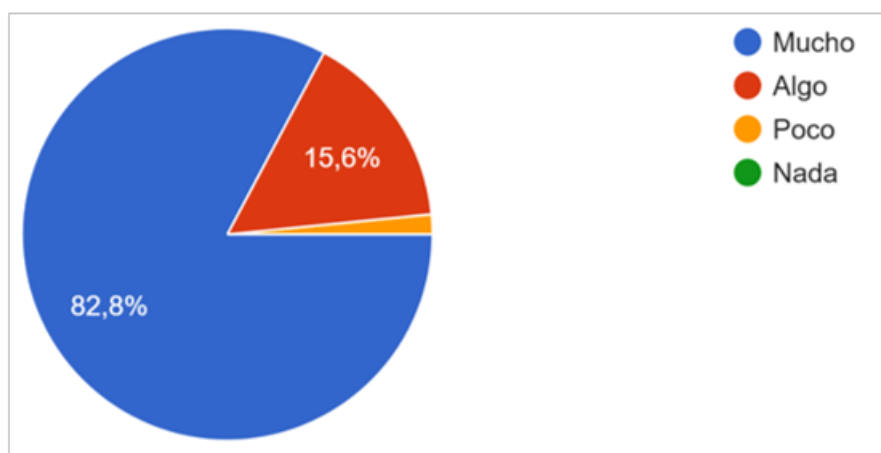
Respecto de la pregunta: ¿Considera usted que la implementación de unidades eléctricas en esta ruta mejoraría la calidad del servicio?, el 59,4% de los encuestados respondió afirmativamente, evidenciando una aceptación mayoritaria hacia la modernización del transporte público mediante tecnologías sostenibles; este respaldo sugiere que los usuarios perciben los autobuses eléctricos como una oportunidad para mejorar aspectos claves del servicio, como comodidad, eficiencia e impacto ambiental.

Sin embargo, un 17,2% expresó rechazo, lo cual, posiblemente, es motivado por dudas sobre la eficacia o confiabilidad de la nueva tecnología; al mismo tiempo, el 23,4% mostró desconocimiento o indecisión, por tanto, se percibe una necesidad

clara de implementar campañas informativas que faciliten la comprensión y generen confianza en la transición hacia unidades eléctricas.

Consecuentemente, el éxito de esta innovación dependerá no solo de la tecnología, sino también de una adecuada gestión del cambio orientada a involucrar y educar a los usuarios.

Gráfico 7 Impacto ambiental



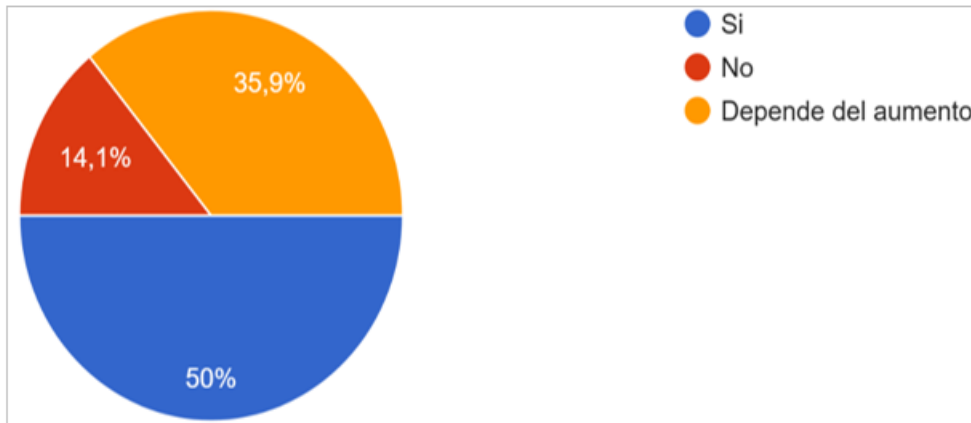
Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

En respuesta a la pregunta: ¿Cuánto le preocupa el impacto ambiental del transporte público actual? Se observa que un 82,8% de los encuestados manifestó una preocupación alta (mucho), lo cual refleja una conciencia ambiental significativa entre los usuarios del servicio. Asimismo, un 15,6% expresó estar algo preocupado, mientras que solo un 1,6% manifestó tener poca o ninguna preocupación al respecto.

Estos resultados evidencian que la mayoría de los usuarios reconocía la importancia del impacto ambiental generado por el transporte público, lo cual

constituye un respaldo fundamental para la adopción de medidas sostenibles, como la implementación de unidades eléctricas.

Gráfico 8 Transporte más limpio y eficiente



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

Ante la pregunta: ¿Estaría usted dispuesto(a) a pagar un poco más por un pasaje si esto implicara un transporte más limpio y eficiente?, la mitad de los encuestados (50%) manifestó su disposición a asumir un costo adicional, lo cual refleja un compromiso significativo con la sostenibilidad y mejora del servicio.

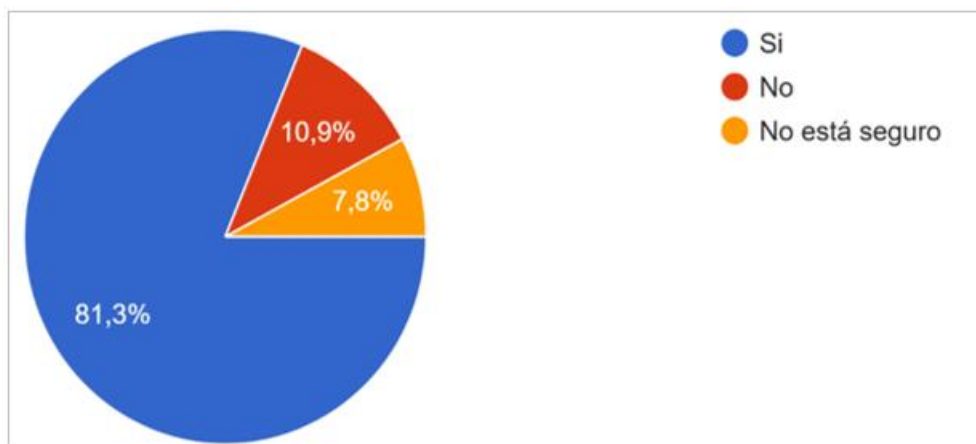
Por otro lado, un 14,1% indicó que no estaría dispuesto a pagar más. Dicha situación sugiere limitaciones económicas o prioridades diferentes en la toma de decisiones de movilidad.

Finalmente, un 35,9% respondió que su aceptación dependería del monto del aumento, lo cual evidencia una postura condicionada que resalta la importancia de establecer un equilibrio entre mejoras en el servicio y el costo para el usuario.

Dichos resultados señalan que, si bien existía un apoyo general hacia la transición hacia un transporte más limpio, es imprescindible diseñar políticas

tarifarias justas y transparentes que consideren la sensibilidad económica de los usuarios para garantizar la viabilidad y aceptación del proyecto.

Gráfico 9 Reducción de la contaminación



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

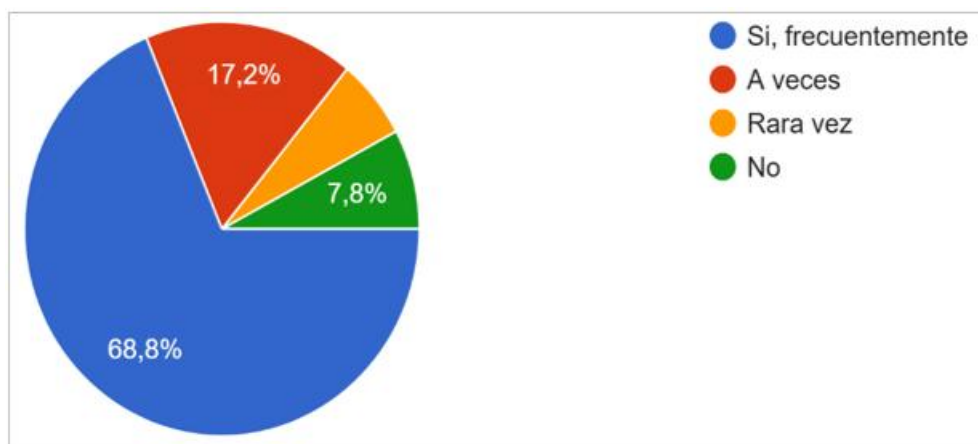
En relación con la pregunta: ¿Cree que el uso de autobuses eléctricos ayudaría a reducir la contaminación en la ruta San José - Alajuela?, un 81,3% de los encuestados consideró que sí, lo cual evidencia una percepción ampliamente favorable hacia los beneficios ambientales de esta tecnología. Este resultado indica que la mayoría de los usuarios asocia la electrificación del transporte público con una reducción directa en los niveles de contaminación, especialmente en una ruta de alta circulación como la que conecta San José con Alajuela.

Por otro lado, un 10,9% de los participantes opinó que el uso de autobuses eléctricos no contribuía significativamente a la disminución de la contaminación, lo cual se justifica por desconocimiento técnico, escepticismo o experiencias previas con iniciativas similares.

Adicionalmente, un 7,8% manifestó no estar seguro, lo cual pone de relieve la necesidad de fortalecer la comunicación pública sobre los impactos reales y medibles de este tipo de soluciones sostenibles.

En conjunto, los resultados evidencian un contexto social ampliamente receptivo. Por tanto, representa una oportunidad estratégica para impulsar políticas de movilidad limpia respaldadas por la opinión ciudadana.

Gráfico 10 Niveles elevados de ruido

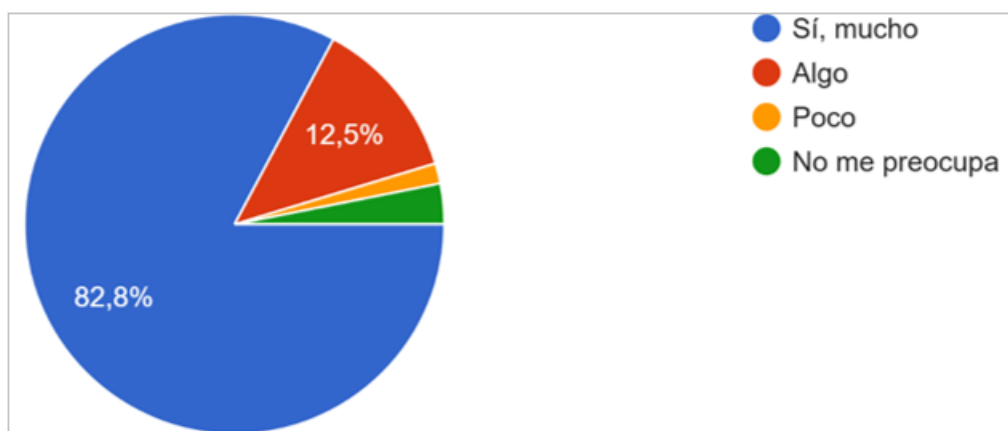


Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

En respuesta a la consulta: ¿Ha notado usted niveles elevados de ruido (bulla) generados por los autobuses actuales en la ruta San José - Alajuela?, el 68,8% de los encuestados indicó que percibía este tipo de contaminación sonora con frecuencia, lo cual evidencia una afectación significativa en términos de confort y ambiente para los usuarios del servicio. Asimismo, un 17,2% señaló que el ruido se presentaba ocasionalmente, mientras que un 6,3% lo notaba raramente y solo un 7,8% manifestó no haberlo percibido.

Estos resultados permiten estimar que el ruido generado por los autobuses actuales representa una molestia constante para una parte considerable de la población usuaria.

Gráfico 11 Niveles de emisiones contaminantes



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

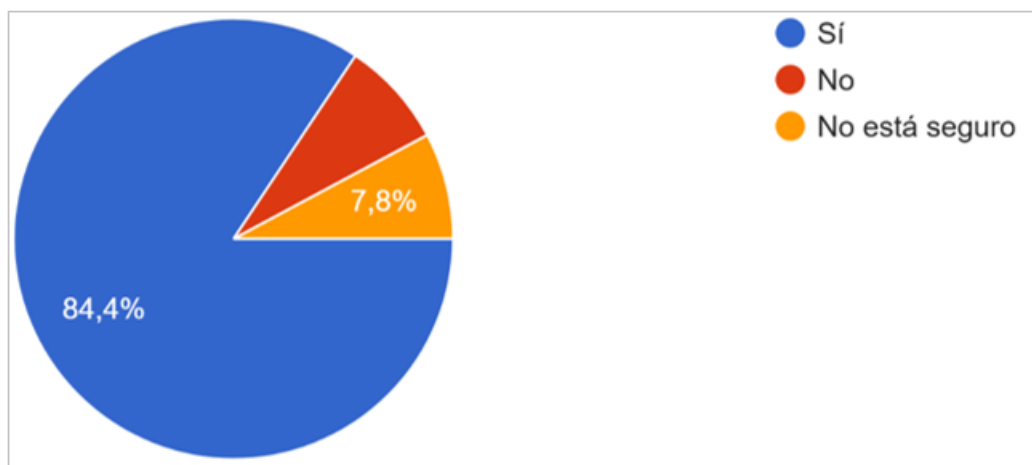
En relación con la consulta: ¿Le preocupa el nivel de emisiones de gases contaminantes (como CO₂) producido por los autobuses actuales de la ruta? Una clara mayoría del 82,8% de los encuestados manifestó sentirse muy preocupada, lo cual evidencia un alto nivel de conciencia ambiental con respecto al impacto negativo del transporte público tradicional sobre calidad del aire y salud pública.

Adicionalmente, un 12,5% indicó estar algo preocupado, mientras que las respuestas que reflejaron una baja o nula preocupación fueron mínimas con apenas un 1,6% señalando que les preocupaba poco y un 3,1% que no les preocupaba en absoluto.

Estos resultados reflejan una preocupación generalizada de la ciudadanía por las emisiones contaminantes generadas por los autobuses actuales, lo cual

constituye un respaldo social relevante para avanzar en la transición hacia tecnologías más limpias, como la electrificación del transporte público.

Gráfico 12 Reducción del ruido



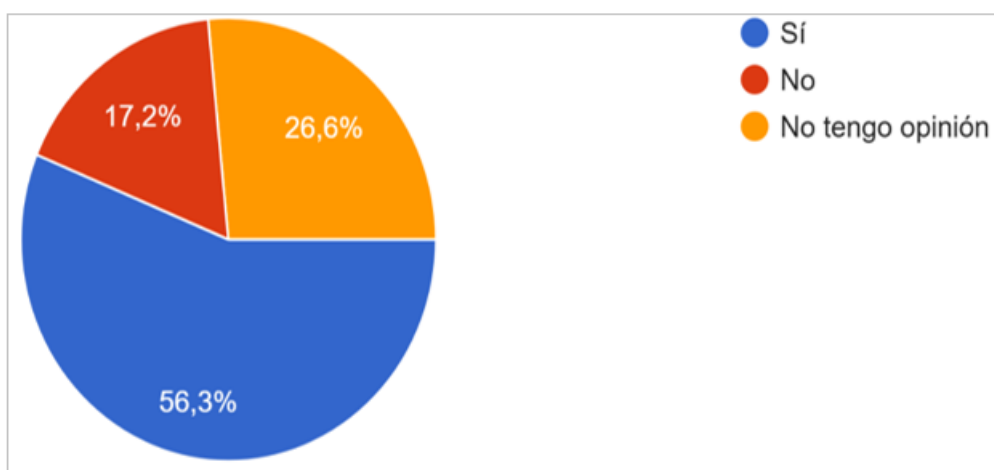
Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

En relación con el análisis de las respuestas a la pregunta: ¿Considera que los autobuses eléctricos podrían reducir significativamente el ruido y la contaminación del aire en la ruta San José - Alajuela? Una amplia mayoría de los encuestados correspondiente a 84.4% percibió que la introducción de autobuses eléctricos en la ruta San José - Alajuela podría contribuir de manera significativa a la reducción, tanto del ruido ambiental, como de la contaminación del aire.

Dicha percepción se sustenta en la premisa ampliamente reconocida de que los autobuses eléctricos operaban con motores menos ruidosos y no generaban emisiones directas de gases contaminantes, lo cual está alineado con las políticas globales de movilidad sostenible y mitigación del cambio climático.

Por otro lado, un 7.8% de los participantes expresó incertidumbre respecto de estos beneficios, lo cual podría deberse a un desconocimiento sobre la tecnología o a dudas sobre la efectividad de su implementación en la realidad operativa de la ruta. Finalmente, otro 7.8% consideró que los autobuses eléctricos no lograrían reducir significativamente el ruido ni la contaminación, probablemente motivados por preocupaciones sobre factores externos como la antigüedad de la infraestructura vial o la intensidad del tráfico que también influyen en la calidad ambiental.

Gráfico 13 Gestión eficiente una flota de autobuses eléctricos



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

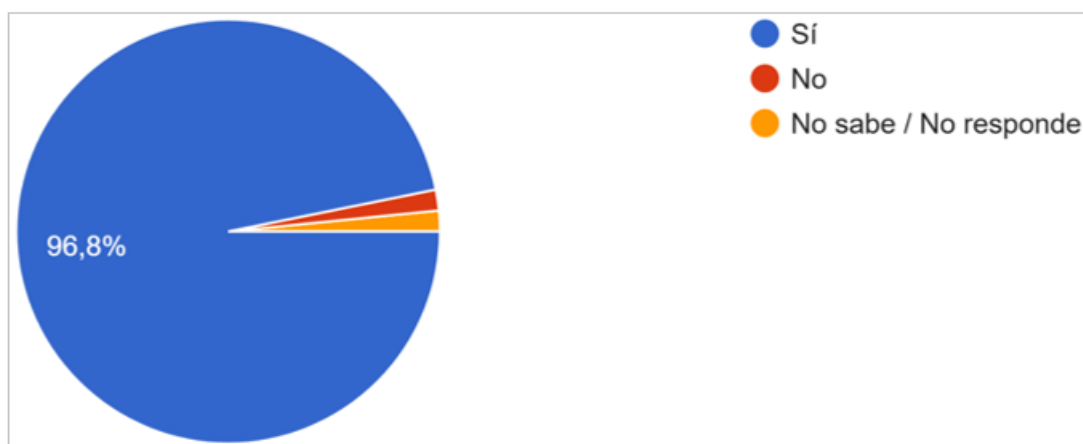
Respecto de la pregunta: ¿Confía en que Grupo TUASA pueda gestionar, de manera eficiente, una flota de autobuses eléctricos?, el 56.3% de los encuestados manifestó confianza en la capacidad de la empresa para administrar adecuadamente esta transición tecnológica. Este nivel de confianza mayoritaria sugiere que más de la mitad de los usuarios percibía que Grupo TUASA contaba

con los recursos, experiencia y capacidad organizacional necesarios para implementar y mantener una flota de autobuses eléctricos.

Sin embargo, un 17.2% de los participantes expresó desconfianza, lo cual podría estar asociado a dudas sobre la preparación técnica o administrativa de la empresa para enfrentar los desafíos que implica la gestión de vehículos eléctricos.

Al mismo tiempo, un significativo 26.6% de los encuestados indicó no tener opinión al respecto, lo que podría reflejar falta de información suficiente o experiencia directa con este tipo de gestión.

Gráfico 14 Gestión eficiente una flota de autobuses eléctricos



Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la encuesta aplicada (2025)

En relación con la pregunta: ¿Le gustaría que se implementaran otras tecnologías sostenibles en el transporte público costarricense? La mayoría de los encuestados (96.8%) manifestó interés y apoyo para la adopción de estas soluciones. Este respaldo tan amplio refleja una creciente conciencia social sobre la necesidad de impulsar iniciativas que contribuyan a la protección ambiental y a la mejora en la calidad de vida urbana.

De la misma manera, un 1.6% de los participantes manifestó rechazo a la implementación de nuevas tecnologías, mientras que otro 1.6% no expresó una opinión clara.

Estos resultados evidencian una aceptación casi unánime hacia la innovación sostenible en el sector transporte, lo cual representa una oportunidad importante para que las autoridades y empresas especializadas desarrollen y promuevan proyectos de movilidad más ecológica y eficiente.

Tabla 16 Beneficios de los autobuses eléctricos

Ítem	Respuestas de las fuentes
14. ¿Cuáles beneficios o inconvenientes considera que tendría el uso de autobuses eléctricos en la ruta San José - Alajuela?	Menos contaminación. Que no sean de alta calidad y sea peor el problema. Implementarlo sería un gran avance para nuestro país, ya que es conocido por ser un país verde. Me parece bien, pero, en mi opinión, los vehículos eléctricos como buses y carros pueden generar un impacto ambiental mayor debido a la contaminación producida cuando sus baterías se deterioran o se descomponen. Esta contaminación derivada de los componentes químicos de las baterías podría ser más perjudicial que las emisiones de gases contaminantes tradicionales. Se pueden implementar buses eléctricos o a hidrógeno, pero, si no se aumenta la frecuencia del servicio, no tendrá mucho impacto. Claro está que si se reducirán significativamente las emisiones contaminantes, tanto en ruido, como en gases. Entre los beneficios, está la reducción de la contaminación. Sin embargo, existen riesgos

asociados, como la conducción temeraria de algunos conductores, lo cual aumenta el peligro de colisiones. Además, en caso de un incendio en las baterías de litio, el país no cuenta con la infraestructura ni los recursos adecuados para atender este tipo de emergencias.

Nota: Elaboración propia del investigador con base en información extraída de la entrevista aplicada (2025)

Los datos recopilados evidenciaron una percepción favorable hacia la implementación de autobuses eléctricos en la ruta San José - Alajuela, destacándose principalmente los beneficios ambientales asociados, tales como reducción de emisiones contaminantes y disminución del ruido. En otras palabras, dicha apreciación se alinea con la visión de promover soluciones de transporte sostenibles que contribuyan a los compromisos nacionales de cuidado ambiental.

No obstante, se identificaron preocupaciones relevantes relacionadas con la calidad técnica de los vehículos y el manejo adecuado de las baterías eléctricas, pues el deterioro y la disposición inadecuada de estos componentes podrían generar un impacto ambiental adverso, contrarrestando los beneficios esperados.

Al mismo tiempo, la efectividad de la implementación se condicionó a mejoras en la operatividad del servicio, como el aumento en la frecuencia de los autobuses. Dicho aspecto es clave para garantizar una reducción significativa en la contaminación y una mayor aceptación por parte de los usuarios.

Finalmente, se destacaron desafíos en materia de seguridad, específicamente, en la capacidad institucional para responder a emergencias derivadas de incidentes relacionados con las baterías de litio. Ello subraya la

necesidad de fortalecer la infraestructura y los protocolos de gestión ante riesgos específicos asociados a esta tecnología.

A continuación, el desarrollo de la recopilación de resultados determinados en estructura o por su respectivo objetivo.

Objetivo 1. Determinar los requerimientos técnicos necesarios para realizar el cambio de la flotilla utilizada en la ruta San José Alajuela de unidades de combustión a unidades eléctricas en el primer semestre del 2025.

Datos relevantes de la ruta en estudio

Para realizar un análisis adecuado de los requerimientos necesarios, se debe visualizar la operación general de la ruta, dado que esto permite observar los factores que influyen en la selección de las unidades y equipos por utilizar. Seguidamente, se evidencia la tabla descriptiva con la información básica de la ruta:

Tabla 17 Datos mes de enero 2025 ruta 200

Empresa de transporte	Transportes Unidos Alajuelenses S. A. (TUASA)
Código de la ruta	200
Código de ramal	R0491
Km por carrera (ida y vuelta)	40
Km diario por unidad	320
Carreras por unidad	8
Costo por viaje	745 colones

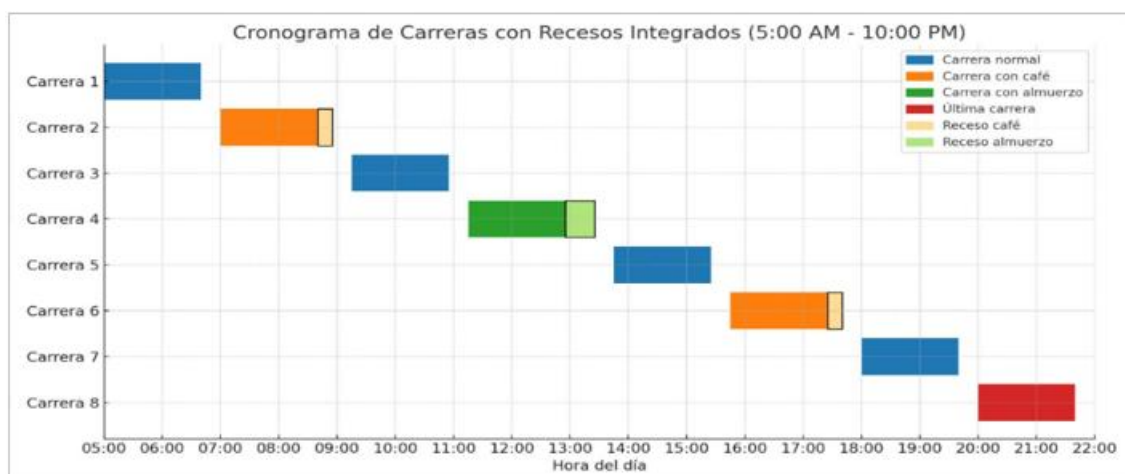
Nota: Elaboración propia del investigador con base en datos obtenidos de ARESEP, 2025

La ruta de San José – Alajuela inicia desde las 5:00 a.m. y finaliza cerca de las 10:00 p.m. con una frecuencia de 10 minutos entre salidas. Como mínimo, se requieren 6 unidades de transporte para brindar un servicio completo y eficiente durante el día. En síntesis, 3 unidades inician en la terminal de San José y 3 en la

terminal de Alajuela, cada unidad recorre un total de 320 km diarios al abarcar 8 carreras, lo cual equivale a viajes ida y vuelta del trayecto.

Seguidamente, en el gráfico, se representa el comportamiento de una unidad de transporte desde el inicio de su jornada, sin tomar en cuenta el cambio de chofer por turno.

Gráfico 15 Cronograma de carreras con recesos integrados

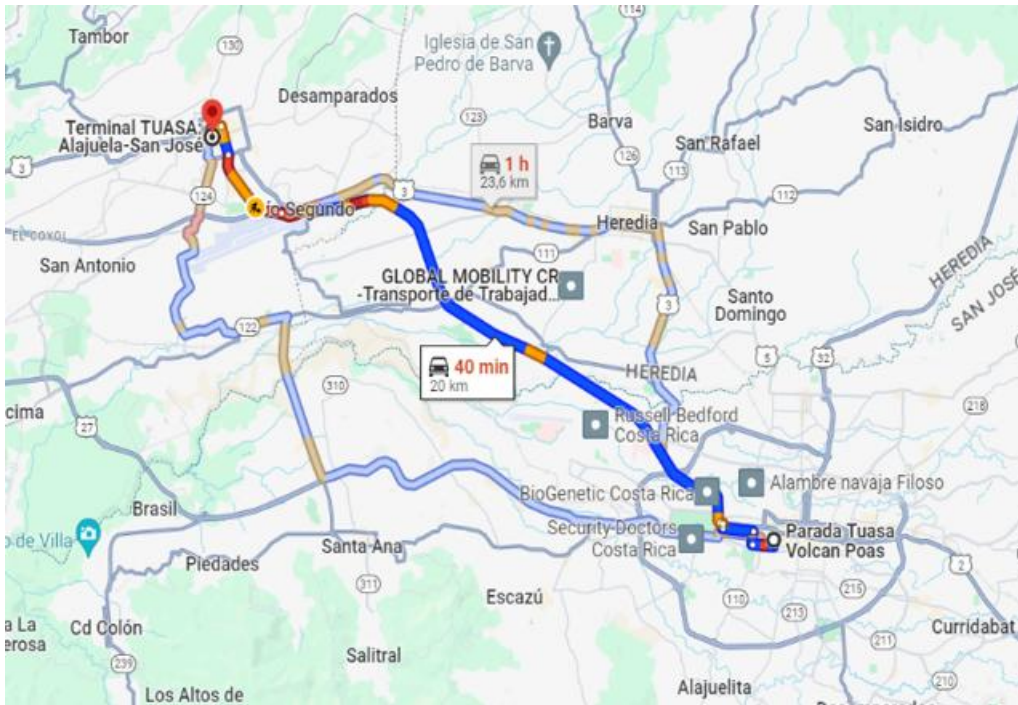


Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Es necesario mostrar el recorrido de cada viaje, lo cual permite evidenciar la cantidad de kilómetros transitados y un estimado del tiempo de desplazamiento entre terminales. No podemos dejar de lado la concurrencia de esta ruta, por ello, los tiempos tienden a elevarse debido al alto flujo de tránsito y algunos factores como accidentes, cierres de vías entre otros aspectos similares.

Seguidamente, se muestra el recorrido seguido por cada autobús:

Ilustración 11 Recorrido de autobuses ruta 200



Nota: Google Maps, 2025

Altimetría del terreno

Un aspecto relevante para la selección de vehículos de desplazamiento con tecnología eléctrica, es la elevación del terreno a la cual serán sometidos, pues el rendimiento y la eficiencia de la unidad es afectada por el esfuerzo realizado al desplazarse en pendientes elevadas. Dicha situación también se refleja en el comportamiento de la vida útil del autobús en términos de mantenimientos generales y capacidad de sostener la carga de sus baterías en la totalidad de la ruta.

Seguidamente la ilustración del trayecto, con una pequeña gráfica en su parte inferior que detalla la elevación que serán sometidas las unidades de transporte a lo largo del desplazamiento.

Ilustración 12 Altimetría del terreno



Nota: Google Maps, 2025

Como se ilustra en la imagen anterior, la inclinación promedio en toda la ruta no supera el 2.7%, lo cual representa un factor determinante en la autonomía del vehículo. Con seguridad, se puede decir que el comportamiento de consumo energético no sufrirá cambios drásticos, sino más bien se mantendrá de manera uniforme.

Descripción de las unidades actuales de combustión interna

En general, todas las unidades de desplazamiento de la empresa Transportes Unidos Alajuelenses (TUASA) presentan características similares. Por ello, se va a seleccionar una en especial, la cual va a permitir realizar los comparativos respectivos y determinar los objetivos con detalle.

La unidad de transporte es de tipo autobús de la marca KING LONG BUS, modelo XMQ6133Y con una capacidad de 53 personas sentadas y 43 personas de

pie, con un valor presentado ante el Ministerio de Hacienda de 52.570.000 millones de colones.

En general, su color representativo es el rojo y todas utilizan un motor de combustión interna de encendido por compresión y turbo alimentado con un desplazamiento de aproximadamente 6800 centímetros cúbicos para una respuesta de potencia de 278 caballos de fuerza en su eje trasero. Seguidamente, en forma detallada, se tabulan las especificaciones directas del motor diésel de la unidad:

Tabla 18 Especificaciones del motor

Fabricante	Man
Denominación	D0836
Tecnología	4 tiempos en línea, inyección directa
Número de cilindros	6
Carrera del pistón (mm)	125
Diámetro interior del cilindro, (mm)	108
Desplazamiento (cc)	6871
Potencia de salida (hp)	326
Salida de par (Nm)	1250
Estándares del euro	Euro 4
Peso, kg	642

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Descripción de las unidades de transporte eléctrico propuestas

Como propuesta, se decide seleccionar seis unidades de transporte eléctricas con los requisitos de desempeño similares o mejores a las unidades diésel y que presenten una autonomía estable durante toda la ruta, pues es de suma importancia que estos equipos no presenten tiempos muertos por conceptos de recargas intermitentes durante su jornada. Además, se requiere que la marca

propuesta cuenta con representación a nivel nacional. La empresa BUSMA ORIENTAL MOTORS S. A., localizada en la provincia de Cartago, cuenta con la autoridad de distribuir la marca Yutong y, por defecto, su respectiva venta de partes y servicio técnico.

Según la publicación hecha por la página oficial de la marca Yutong en noviembre del 2024, la nueva tecnología y la capacidad de refrigeración de sus baterías de litio permiten tener una prestación de 0.74 kwh/km. Por ende, se requiere, como mínimo, una capacidad de carga por unidad superior a los 300 kwh. Mencionado lo anterior, se selecciona el modelo de autobús eléctrico Yutong C13E, el cual posee las siguientes características:

Tabla 19 Características de autobús eléctrico Yutong C13E

Modelo	Yutong C13E
Tamaño (mm)	12370-2500-3610
Capacidad de motor (Hp)	288
Capacidad de torque (Nm)	1260
Peso máximo (Kg)	18000
Batería (kwh)	LFP 350
Autonomía (km)	473
Espacios sentados	57+1

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Estación de recarga nocturna

Para efectos del presente estudio, se necesitaría una estación de carga en cada terminal, una que permita conectar 3 unidades de transporte en San José Centro y otra para 3 unidades de transporte en la terminal de Alajuela.

Parte fundamental en la descripción de las necesidades para la implementación de la estación de recarga nocturna es la utilización de un tipo de cargador que permita una comunicación directa con los componentes electrónicos de la batería y la unidad. Por ello, se selecciona un cargador del mismo fabricante y, bajo su recomendación, se decide optar por el cargador Yutong modelo SZ-160.

Tabla 20 Características del cargador Yutong SZ-160

Voltaje de entrada trifásica	480 voltios
Potencia	160kw
Corriente de entrada	192 amperios
Número de pistolas por estación	1
Frecuencia de red	60Hz
Factor de potencia	0.99

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

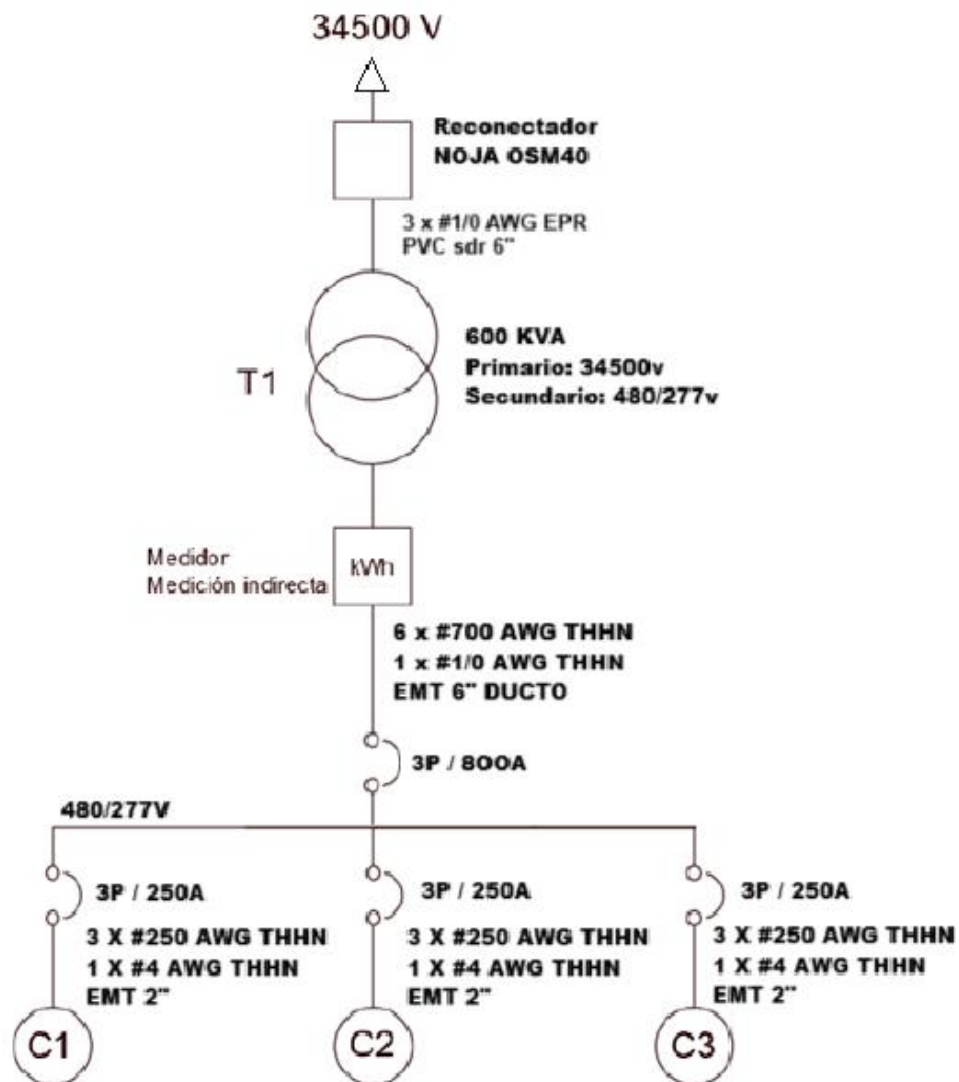
Como buena práctica, se debe instalar utilizando las recomendaciones del Código Eléctrico Nacional, para el cumplimiento de la normativa vigente. En ese sentido, por medio de un diagrama unifilar (Ilustración 13), se ejemplifica el posible proyecto de instalación de la acometida eléctrica para ambas terminales autobuseras, bajo las siguientes indicaciones:

- Cada terminal autobusera presenta una estación con tres pistolas de conexión, con una potencia total requerida de 480 kw.
- Dichas estaciones cuentan con la posibilidad de instalación de un transformador de pedestal contiguo a sus alimentadores principales, esto en el patio de maniobras.
- Para las dos terminales, se considera una distancia aproximada de 12 metros, desde el transformador, hasta el tablero principal.

- Se estima que la primera estación de recarga estaría a 4 metros desde el tablero principal y, a su vez, los siguientes puntos a 10 y a 16 metros respectivamente.

A continuación, se especifica el diagrama unifilar propuesto:

Ilustración 13 Diagrama unifilar



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Seguidamente, se detallan los materiales necesarios para dicha instalación:

Tabla 21 Materiales requeridos para instalación eléctrica

Artículo	Cantidad
Conductor #250 AWG THHN negro	30 m
Conductor #250 AWG THHN rojo	30 m
Conductor #250 AWG THHN azul	30 m
Conductor #4 AWG THHN verde	30 m
Conductor #700 AWG THHN negro	72 m
Conductor #1/0 AWG THHN verde	12 m
Conductor #1/0 EPR 35kv	18 m
EMT 6" tipo ducto	12 m
EMT 2"	30 m
Disyuntor 3P/250 A	3
Disyuntor 3P/800 A	1
Tablero 1200 A	1
Base de medidor de 3m 5/8"	1
Reconectador Media Tensión	1
Transformador pedestal	1

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Objetivo 2. Analizar los resultados de la investigación en cuanto a costos de mantenimiento, consumo energético e impacto ambiental de los automotores diésel y sus similares eléctricos.

Costos de mantenimiento general para la flotilla de movilidad por motor de combustión

Existen costos comunes no definidos en este apartado, como desgaste de llantas, engrase, frenos y sistema hidráulico, pues ambas flotillas utilizan estos factores en igualdad de condiciones. Por ende, se analizarán los estrictamente relacionados o vinculados a las unidades con motor de combustión. En el documento denominado "Metodología para la fijación ordinaria de tarifas para el

servicio de transporte remunerado de personas, modalidad autobús” emitido por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos mediante la resolución RJD 035-2016, se establece la forma de realizar el cálculo del costo por concepto de mantenimiento para las unidades de transporte a base de motor de combustión interna. En la tabla siguiente, se detallarán los montos relacionados con el gasto mensual por unidad de transporte (ver memoria de cálculo anexo 4).

Tabla 22 Conceptos de mantenimiento para la ruta 200

Descripción del costo asociado	Valor mensual por una unidad
Costo por consumo de combustible	Ø3.211.190
Costo por consumo de aceite de motor	Ø219.648
Costo por aceite de caja de cambios	Ø30.412
Costo de consumo en filtros	Ø10.240

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Es necesario aclarar que el costo mensual de una unidad por consumo de combustible se define de la siguiente manera.

$$CCC_r = ccc_y \times (1 + ccsr) \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PC$$

Bajo el criterio de las siguientes variables:

- $cccy$: coeficiente de consumo de combustible por tipo de ruta.
- $ccsr$: coeficiente de ajuste de acuerdo con la superficie de rodamiento.
- Dr : distancia de la carrera de la ruta en kilómetros sumando ambos sentidos del recorrido.
- cki : coeficiente de ajuste por reconocimiento de kilometraje improductivo.
- CM_r : cantidad de carreras mensuales de la ruta.
- PC : precio promedio del diésel.

- r: ruta de transporte remunerado de personas.

El valor de cada uno de los coeficientes se obtiene de las ilustraciones presentadas en el documento denominado “Metodología para la fijación ordinaria de tarifas para el servicio de transporte remunerado de personas, modalidad autobús” emitido por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos mediante la resolución RJD 035-2016.

Ilustración 14 coeficiente de consumo de combustible (cccy)

Tipo de ruta	Consumo unitario de combustible diésel (L/km)
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	0,47
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	0,47
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	0,46
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	0,43
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	0,43

Nota: ARESEP, 2025

Ilustración 15 coeficiente de ajuste de acuerdo con la superficie de rodamiento (ccsr)

Descripción	Coeficiente de ajuste según las condiciones de la superficie de rodamiento
<i>Si el recorrido de la ruta “r” tienen igual o menos del 20% no pavimentado</i>	0,00
<i>Si el recorrido de la ruta “r” tiene más del 20% no pavimentado</i>	0,10

Nota: ARESEP, 2025

Ilustración 16 coeficiente de ajuste por reconocimiento de kilometraje improductivo (cki)

<i>Rango de distancia por viaje de la ruta (km)</i>	<i>Zona</i>	<i>Coeficiente de reconocimiento por tiempo improductivo</i>
<i>0 y 25</i>	<i>Urbana</i>	<i>0,10</i>
<i>Mayor de 25</i>	<i>No urbana</i>	<i>0,05</i>

Nota: ARESEP, 2025

Para el costo mensual de una unidad por consumo de aceite de motor, también se tiene una fórmula con diferentes valores, estos en igualdad de condiciones de la ruta.

$$CCAM_r = \frac{ccam_y}{fcam_y} \times (1 + ccsr) \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PAM$$

Estas bajo el criterio de las siguientes variables:

- *ccamy*: cantidad de litros de aceite de motor definida por el tipo de ruta
- *fcamy*: frecuencia del cambio de aceite de motor definida por el tipo de ruta según el siguiente cuadro.
- *PAM*: precio del aceite de motor en colones por litro.

El valor de cada uno de los coeficientes se obtiene de las siguientes ilustraciones:

Ilustración 17 Cantidad de litros de aceite de motor (ccamy)

Tipo de ruta	Cantidad de litros de aceite de motor (litros)
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	30,0
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	30,0
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	30,0
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	30,0
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	38,0

Nota: ARESEP, 2025

Ilustración 18 Frecuencia del cambio de aceite de motor (fcammy)

Tipo de ruta	Frecuencia de cambio del aceite de motor (km)
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	10.000
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	10.000
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	10.000
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	10.000
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	20.000

Nota: ARESEP, 2025

Es importante considerar, que, de igual manera el costo mensual por consumo de aceite para las cajas de transmisión se define bajo la siguiente fórmula:

$$CCACC_r = \frac{ccacc_y}{facc_y} \times (1 + ccsr) \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PAC$$

Dicho cálculo se realiza bajo el criterio de las siguientes variables:

- ccaccy: cantidad de litros de aceite de caja de cambios definida por el tipo de ruta.
- faccy: frecuencia del cambio de aceite de caja de cambios definida por el tipo de ruta.
- PAC: precio del aceite de caja de cambios en colones por litro.

El valor de cada uno de los coeficientes se obtiene de las siguientes ilustraciones:

Ilustración 19 Cantidad de litros de aceite de caja de cambios (ccaccy)

Tipo de ruta	Cantidad de litros de aceite de caja de cambios (litros)
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	16,00
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	16,00
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	16,00
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	16,00
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	16,00

Nota: ARESEP, 2025

Ilustración 20 Frecuencia del cambio de aceite de caja de cambios (fcaccy)

Tipo de ruta	Frecuencia de cambio del aceite de caja de cambios (km)
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	50.000
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	50.000
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	50.000
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	50.000
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	160.000

Nota: ARESEP, 2025

El costo mensual de una unidad por consumo de filtros de combustible se define de la siguiente manera:

$$CCFC_r = \frac{ccfc_y}{fcfc_y} \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PF$$

Dicho cálculo se realiza bajo el criterio de las siguientes variables:

- ccfcy: conjunto de filtros de combustible por autobús definido por el tipo de ruta.
- fcfcy: frecuencia del cambio de conjunto de filtros de combustible definida por el tipo de ruta.
- PF: precio del conjunto de filtros de combustible en colones.

El valor de cada uno de los coeficientes se obtiene de las siguientes ilustraciones:

Ilustración 21 Conjunto de filtros de combustible por autobús (ccfcy)

<i>Tipo de ruta</i>	<i>Conjunto de filtros de combustible (uno racor y uno común)</i>
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	<i>1,0</i>
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	<i>1,0</i>
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	<i>1,0</i>
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	<i>1,0</i>
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	<i>1,0</i>

Nota: ARESEP, 2025

Ilustración 22 Frecuencia del cambio de conjunto de filtros de combustible (fcfcy)

<i>Tipo de ruta</i>	<i>Frecuencia de cambio conjunto de filtros de combustible por autobús (km)</i>
<i>Ruta Urbana dentro de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	<i>16.500</i>
<i>Ruta Urbana fuera de la GAM, recorrido en un sentido ≤ 25 km</i>	<i>16.500</i>
<i>Ruta Interurbana corta, recorrido en un sentido > 25 km y ≤ 50 km</i>	<i>16.500</i>
<i>Ruta Interurbana media, recorrido en un sentido > 50 km y ≤ 100 km</i>	<i>16.500</i>
<i>Ruta Interurbana largo, recorrido en un sentido mayor 100 km</i>	<i>28.500</i>

Nota: ARESEP, 2025

Costo de mantenimiento de las unidades eléctricas

Según la revista virtual AEM Dailynews, en su publicación denominada: “Estudio comparativo de los costes de mantenimiento y consumo energético de

diferentes tipologías de propulsión de autobuses” publicada el 16 de marzo de 2023, hace referencia al costo de mantenimiento y consumo energético para autobuses eléctricos y su similar diésel con tecnología EURO4, para unidades con un promedio de 3 a 15 años de circulación.

Tabla 23 Costo de mantenimiento por kilómetro según su tiempo de circulación

Costo mantenimiento	Euro / Km	Colón / Km
Diésel 3 años	€0,42	¢244,57
Eléctrico 3 años	€0,18	¢104,81
Diésel 15 años	€0,73	¢425,08
Eléctrico 15 años	€0,26	¢151,40

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Tabla 24 Consumo energético por kilómetro para unidades eléctricas y diésel euro4

Costo Energético	Euro / Km	Colón / Km
Diésel	€0,86	¢334,49
Eléctrico	€0,07	¢51,11

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

En resumen, el costo de mantenimiento mensual por unidad para autobuses de impulsión por motor diésel con 3 años de funcionamiento equivale a 2.347.872 colones en comparación con su similar eléctrico, cuyo valor sería de 1.006.176 colones. En relación con el consumo energético, la unidad de propulsión eléctrica requiere de una inversión de 490.688 colones mensuales para su respectivo funcionamiento, mientras que su similar de motor de combustión requiere de 3.211.190 colones para compra de diésel.

Costo de adquirir los autobuses eléctricos y cargadores

De acuerdo con la publicación realizada por el Ministerio de Ambiente y Energía llamada “Evaluación de resultados, lecciones aprendidas y provisión de

recomendaciones técnicas para el despliegue de buses eléctricos”, se recopilan datos suministrados por ARESEP, donde se indica el precio promedio de los autobuses eléctricos y sus respectivos cargadores.

Tabla 25 Costo de adquisición de unidades

Precio	Autobús eléctrico	Cargador
Dólares	\$260.000	\$4.000
Colones	₡133.640.000	₡2.056.000

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Costo de las baterías

El Ministerio de Ambiente y Energía, en su publicación titulada: “Evaluación de resultados, lecciones aprendidas y provisión de recomendaciones técnicas para el despliegue de buses eléctricos”, recopila datos suministrados por ARESEP, donde se indica que el precio promedio de las baterías es de 28 000 dólares

Las baterías LFP de 350kwh propuestas en la oferta del autobús presentan una vida útil de 3000 ciclos de carga. Según el estudio realizado a la unidad de transporte eléctrica, esta evidencia una autonomía de 441 km. Por ello, se estima que se realizaría la carga completa después de su jornada total, lo cual conlleva a prever un deterioro de la vida útil de las baterías a los 8 años de uso.

Costo de los materiales eléctricos

Se solicita una cotización (ver anexo adjunto) a una empresa dedicada a temas de instalación y proyectos de acometidas de media tensión, la cual ofrece un detalle aproximado por concepto de instalación del transformador, conexión,

pruebas, diseños y permisos constructivos, además de detalles como colocación de malla a tierra y otros aspectos para la entrega de la acometida.

Seguidamente el detalle del costo aproximado de los materiales necesarios para la cometida.

Tabla 26 Costo de los materiales para realizar la infraestructura de carga

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Conductor #250 AWG THHN negro	30 m	¢13.060	¢391.800
Conductor #250 AWG THHN rojo	30 m	¢13.060	¢391.800
Conductor #250 AWG THHN azul	30 m	¢13.060	¢391.800
Conductor #4 AWG THHN verde	30 m	¢2.800	¢84.000
Conductor #700 AWG THHN negro	72 m	¢32.000	¢2.304.000
Conductor #1/0 AWG THHN verde	12 m	¢9.500	¢114.000
Conductor #1/0 EPR 35kv	18 m	¢8.500	¢153.000
EMT 6" tipo Ducto	12 m	¢26.000	¢312.000
EMT 2"	30 m	¢16.895	¢168.950
Disyuntor 3P/250 A	3	¢631.000	¢1.893.000
Disyuntor 3P/800 A	1	¢1.700.000	¢1.700.000
Tablero 1200 A	1	¢2.400.000	¢2.400.000
Base de medidor de 3m 5/8"	1	¢50.000	¢50.000
Reconectador NOJA	1	¢25.215.985	¢25.215.985
Transformador de pedestal	1	¢21.000.000	¢21.000.000
Instalación y pruebas	1	¢20.172.788	¢20.172.788
TOTAL		¢76.743.123	

Nota: IESA S.A., 2025

Impacto ambiental

Según el documento publicado por el Repositorio Digital de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe llamado "Estudio de impacto económico de las inversiones y el financiamiento para el recambio de flota de autobuses

sostenibles en Costa Rica”, se indica el efecto de la utilización de transporte público eléctrico en las emisiones de gases contaminantes y el valor de importación de los hidrocarburos para el país.

En ese sentido, se realiza un comparativo de la cantidad de litros de diésel ahorrados y el ahorro por disminución de la factura petrolera en la actualidad y su estimación para el 2055, además de las emisiones de CO2 evitadas al año.

Tabla 27 Impacto en el ambiente

	Millón de litros / año	Precio diésel \$ / L	Ahorro millón \$/ año
2025	1.28	0.80	1.02
2055	42.00	1.46	61.31
	Ton CO2 evitada / año	Precio CO2 ton / año	Ahorro millón \$ / año
2025	4.14	25.00	0.10
2055	135.91	50.00	6.80

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Con base en la tabla anterior, se deja en evidencia que es inevitable alcanzar beneficios, tanto económicos, como ambientales con el aumento de vehículos de propulsión eléctrica. Por ende, es irrefutable decir que los avances en la tecnología de los automotores en el mundo están enfocados en la preservación y el ahorro de los recursos naturales.

Para el presente estudio, y con respecto a los datos reflejados en la tabla anterior, además del costo por consumo de combustible mencionado en las secciones anteriores, se puede estimar que, para 6 unidades con motor a diésel, el

dato de litros de combustible por año equivale a 409.213 litros, esto implicaría poder evitar la emisión de 1.32 toneladas de CO₂ por año.

Objetivo 3: Comparar los costos operativos y de inversión entre las unidades eléctricas y las unidades convencionales (diésel), para determinar la rentabilidad del cambio tecnológico.

Este objetivo busca establecer si la reconversión tecnológica de la flota de transporte público, mediante la sustitución de unidades diésel por autobuses eléctricos, representa una inversión financieramente viable. Para ello, se realiza un análisis que considera los componentes estructurales del proyecto, incluyendo monto de inversión inicial, costo de adquisición de activos, infraestructura de soporte necesaria, así como costos recurrentes de operación y mantenimiento.

Asimismo, se estiman los ingresos proyectados en función de la demanda del servicio para, posteriormente, aplicar los indicadores correspondientes.

La comparación entre los escenarios de movilidad eléctrica y de combustión interna se fundamentan en datos técnicos, supuestos económicos y proyecciones realistas, lo cual fortalece la solidez de las conclusiones obtenidas.

Inversión Inicial

La inversión inicial constituye uno de los elementos fundamentales para evaluar la factibilidad financiera del proyecto, ya que engloba todos los recursos económicos necesarios para su implementación y puesta en operación. En este caso, se contemplan dos escenarios de inversión: uno para la adquisición y operación de una flotilla compuesta por seis autobuses eléctricos, y otro para una flotilla equivalente de autobuses con motor diésel.

Inversión para la puesta en marcha de seis autobuses eléctricos

El esquema de inversión estimado para el escenario eléctrico abarca diversos componentes esenciales, desde la adquisición de los autobuses, hasta la adecuación de la infraestructura de carga, pasando por gastos operativos iniciales. La siguiente tabla presenta el desglose de esta inversión:

Tabla 28 Inversión inicial autobuses eléctricos

Cálculo de la inversión inicial	
Autobuses eléctricos	¢795.600.000
Cargadores	¢12.240.000
Infraestructura de carga	¢76.743.123
Gastos preoperativos	
Mercadeo	¢6.000.000
Gestiones Legales	¢4.300.000
Eventualidades	¢25.000.000
Total inversión inicial	¢919.883.123

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

b) Inversión para la puesta en marcha de seis autobuses de diésel

Para ofrecer una opción de comparación con la propuesta de autobuses eléctricos, se analiza la inversión necesaria para poner en marcha una flota compuesta por seis autobuses con motor de combustión diésel. Esta alternativa presenta un desembolso inicial menor, lo cual puede representar un atractivo desde el punto de vista financiero a corto plazo.

El gasto más importante está en la compra de los seis automotores, cuyo precio total es de ¢315.420.000, basándose en valores actuales del mercado para unidades nuevas y con características adecuadas al servicio planificado.

Tabla 29 Inversión inicial autobuses diésel

Cálculo de la inversión inicial	
Autobuses diésel	₡315.420.000
Gastos operativos	
Mercadeo	₡6.000.000
Legales	₡4.300.000
Eventualidades	₡25.000.000
Total inversión inicial	₡350.720.000

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Los costos adicionales previos a iniciar operaciones contemplan los siguientes aspectos:

- **Promoción:** un presupuesto de ₡6.000.000 será utilizado en actividades de mercadeo para dar a conocer el servicio y captar la atención de los usuarios.
- **Asesoría legal y trámites:** se consulta a profesionales en derecho y se estima asignar ₡4.300.000 para cubrir costos relacionados con la contratación, permisos, revisión de documentos legales, trámites aduaneros y asesorías necesarias para formalizar el proyecto.

Finalmente, se incluye una partida de ₡25.000.000 para contingencias con el propósito de contar con un respaldo financiero que permita enfrentar posibles imprevistos durante el inicio del negocio. En este apartado se incluye, capacitación del personal técnico y operativo.

Sumando todos estos gastos, la inversión inicial total para esta opción alcanza ₡350.720.000.

Costos operativos

Los costos operativos representan un componente clave en el análisis de viabilidad económica de cualquier sistema de transporte público, ya que engloban los egresos recurrentes necesarios para asegurar la prestación continua y eficiente del servicio. En este apartado, se desglosan, tanto los costos fijos, como aquellos relacionados con el consumo energético y el mantenimiento de las unidades, considerando las dos alternativas tecnológicas: eléctrica y de combustión interna. Esta distinción permite ofrecer una comparación objetiva entre ambas opciones.

Costos fijos

Los costos fijos hacen referencia a aquellos gastos que se mantienen relativamente constantes sin importar la cantidad de recorridos realizados o el volumen de pasajeros transportados. En ese sentido, son desembolsos que la operación debe afrontar en forma periódica e independiente del nivel de actividad, y resultan indispensables para la estructura funcional del sistema.

Entre los principales rubros que conforman este grupo, se incluyen los siguientes:

- **Salarios del personal operativo:** comprende la remuneración mensual de seis conductores, los cuales se encargan directamente de la prestación del servicio.
- **Sueldos del personal administrativo:** corresponden a cuatro colaboradores encargados de labores de planificación, coordinación, atención al cliente y gestión general del servicio.

- **Personal técnico y de mantenimiento:** engloba a cuatro trabajadores encargados de la inspección, diagnóstico, reparación y soporte mecánico de las unidades.
- **Cargas sociales y obligaciones legales:** incluyen los aportes patronales a la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), pólizas obligatorias del Instituto Nacional de Seguros (INS), así como otros compromisos como aguinaldo, vacaciones y cesantía.

A continuación, se presenta un resumen de los costos fijos mensuales y su proyección anual:

Tabla 30 Costos fijos

Costos fijos de operación	Monto mensual	Monto anual
Salario personal de operación	₡3.836.150,40	₡46.033.804,80
Salario personal administrativo	₡1.596.814,76	₡19.161.777,12
Salario personal mantenimiento	₡1.652.094,00	₡19.825.128,00
Cargas sociales	₡1.889.585,28	₡22.675.023,34
Póliza INS	₡101.316,35	₡1.215.796,15
Provisiones de ley	₡1.475.109,32	₡17.701.311,81
Total	₡10.551.070,10	₡126.612.841,21

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Costos energéticos mensuales

Desde una perspectiva financiera, los costos energéticos constituyen una de las variables operativas más relevantes al evaluar proyectos de transporte público. Su análisis permite identificar diferencias estructurales claves entre tecnologías

basadas en combustibles fósiles y aquellas impulsadas por energías limpias, particularmente en términos de eficiencia y rentabilidad a largo plazo.

En el caso de los autobuses eléctricos, el suministro energético proviene de la red de alimentación nacional y a su vez a las baterías recargables que además requieren de inversión en infraestructura de carga, pero ofrecen un rendimiento energético superior y una tarifa por kilómetro considerablemente más baja en comparación con los motores diésel. Esta mayor eficiencia se traduce en menores egresos operativos recurrentes.

A continuación, se presenta una comparación de los costos energéticos estimados para ambos tipos de tecnología, los cuales son calculados con base en consumos promedio y tarifas vigentes:

Tabla 31 Consumo de energía

Consumo de energía	Eléctrico	Diésel
Costo por mes	₡490.688,35	₡3.211.190,40
Costo por año	₡5.888.260,22	₡38.534.284,80
Costo por 15 años	₡88.323.903,36	₡578.014.272,00

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

El diferencial acumulado a 15 años equivalente a ₡489.690.368,64 a favor de la alternativa eléctrica, se evidencia una ventaja financiera significativa que reduce la exposición a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y mejora el flujo de caja operativo del proyecto.

Por otra parte, el mantenimiento de los autobuses diésel implica mayores costos recurrentes debido a la complejidad de sus componentes mecánicos, tales como el motor de combustión interna, transmisión, sistema de escape y necesidad

periódica de reemplazo de filtros, lubricantes y piezas móviles. Esta naturaleza intensiva en componentes y servicios incrementa, tanto la frecuencia de intervención, como el gasto por unidad de recorrido.

Por lo contrario, al eliminar muchos de los sistemas mecánicos tradicionales, los autobuses eléctricos presentan una estructura de mantenimiento más simplificada y menos costosa. Si bien requieren revisiones especializadas en baterías, electrónica de potencia y software de control, estas intervenciones son menos frecuentes y de menor impacto presupuestario en el largo plazo.

A continuación, se presenta un resumen comparativo de los costos de mantenimiento según la tecnología utilizada:

Tabla 32 Costos de mantenimiento

Costo de mantenimiento	Eléctrico	Diésel
Costo por km	₡104,81	₡244,57
Costo por mes	₡1.006.176,00	₡2.347.872,00
Costo por año	₡12.074.112,00	₡28.174.464,00
Costo por 15 años	₡181.111.680,00	₡422.616.960,00

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

El diferencial acumulado en costos de mantenimiento a un horizonte de 15 años asciende a ₡241.505.280,00, lo cual representa una disminución del 57,1% en favor de la tecnología eléctrica. Este ahorro se traduce en una mejora directa

Proyección de ingresos operativos semestrales

La estimación de los ingresos generados por la operación de una unidad de transporte público en la ruta San José – Alajuela durante el primer semestre de 2025 constituye un indicador clave para la evaluación financiera del proyecto. Estos

ingresos representan el flujo de caja operativo principal para la recuperación de la inversión y permiten realizar un análisis comparativo frente a los costos de operación y capital.

Para el estudio, se adopta un escenario operativo estándar que contempla la prestación del servicio en días hábiles y fines de semana con una frecuencia constante de ocho viajes diarios (ida y retorno). El promedio de pasajeros por viaje se establece en 96 con base en información histórica proporcionada por la empresa operadora y conforme a las tarifas oficiales vigentes.

A continuación, se presenta el cálculo proyectado de ingresos:

Tabla 33 Datos de la ruta para Tarifa

Concepto	Valor
Tarifa por pasajero	¢745
Promedio de pasajeros por carrera	192
Carreras por día (ida y vuelta)	8
Pasajeros transportados por día	1.536
Días de operación	360
Pasajeros transportados en el año por unidad	552.960
Ingreso total estimado en el año por unidad	¢411.955.200

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

El flujo estimado de ingresos operativos representa un componente esencial en la evaluación completa de la rentabilidad del proyecto al ofrecer una medida clara de su potencial para generar utilidades.

Análisis de resultados

Seguidamente se detalla la comparación del costo total de inversión para las dos flotillas con su respectiva tecnología de propulsión, los valores descritos pertenecen a los rubros estimados en una continuidad operativa de 15 años, dado que es el periodo de vigencia para las unidades que impone la ley para las empresas autobuseras en el país.

Tabla 34 Comparación y detalle del costo total de inversión

Autobuses	diésel	eléctricos	diferencia
Inversión inicial	¢357.028.400	¢919.883.123	¢562.854.723
Inversión a los 7 años de la adquisición de las unidades	¢60.000.000	¢85.680.000	¢25.680.000
Consumo de energía para 6 unidades durante 15 años	¢3.468.085.632	¢529.943.418	¢2.938.142.214
Costo de mantenimiento para 6 unidades durante 15 años	¢2.535.701.760	¢1.086.670.080	¢1.449.031.680
Costos fijos	¢1.899.192.600	¢1.899.192.600	¢0
Costo asociado aceite de motor	¢237.219.840	¢0	¢237.219.840
Aceite de caja de cambios	¢32.844.960	¢0	¢32.844.960
Filtros de combustible	¢11.059.200	¢0	¢11.059.200
Total	¢8.594.823.992	¢4.521.369.221	¢4.073.454.771
Total en dólares	\$16.786.765	\$8.830.799	\$7.955.966

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

Tabla 35 Estimación de ingresos totales durante 15 años de gestión

Moneda	colones	dólares
Ingreso anual por unidad	¢411.955.200	\$801.469
Ingreso anual para 6 unidades	¢2.471.731.200	\$4.808.815
Ingreso total durante 15 años	¢37.075.968.000	\$72.132.233

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2025

En resumen, ambas tecnologías presentan utilidades muy por encima de su inversión inicial y sus costos operativos, por ello se puede afirmar con seguridad

que ambos proyectos son viables en cuanto a la capacidad de generar ganancias sobre el capital invertido, por ejemplo, utilizando la flotilla de autobuses a diésel, se evidencia un ingreso limpio de \$55.410.786 millones de dólares durante los 15 años del periodo en vigencia, pero es sumamente importante destacar que las ganancias por la utilización de unidades eléctricas, es mucho mayor en el plazo establecido, este valor es cercano a los \$63.428.289 millones de dólares, aproximadamente \$8.017.503 millones de diferencia.

En cuanto a la recuperación del capital invertido, tomando como criterio el valor de las ganancias anuales, se refleja que la flota diésel presenta una recuperación más rápida de la inversión y una mayor rentabilidad en el corto plazo, estos resultados están estrechamente vinculados con su menor inversión inicial. Sin embargo, a medida en que transcurre el tiempo, los mayores costos operativos y de mantenimiento tienden a reducir esa ventaja, lo cual afecta su eficiencia financiera en el largo plazo.

No obstante, los menores costos operativos y de mantenimiento característicos de los autobuses eléctricos permiten compensar, de manera progresiva, la inversión inicial más elevada, lo cual mejora su rentabilidad conforme avanza el horizonte del proyecto. Además, esta opción no solo presenta ventajas económicas a largo plazo, sino que también incorpora beneficios estratégicos asociados a sostenibilidad, eficiencia energética y disminución del impacto ambiental. Dichos elementos fortalecen su valor integral más allá de un análisis financiero. Se estima que para la flotilla diésel la inversión total se estaría recuperando en 3.5 años en condiciones óptimas de las unidades y un flujo

constante de la demanda del servicio, en comparación con la flotilla eléctrica que presenta una recuperación de la inversión total en 1.8 años.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La implementación de autobuses eléctricos en la ruta San José – Alajuela es técnicamente viable, siempre que se instale la infraestructura de carga adecuada y se seleccione una flota con autonomía suficiente para cubrir los recorridos sin afectar la frecuencia del servicio.

El autobús eléctrico, su cargador y la infraestructura de recarga seleccionada en este estudio, cumple en su totalidad con los requerimientos técnicos necesarios para operar de manera eficiente, incluyendo, autonomía, capacidad de pasajeros y rendimiento en los desplazamientos.

La sustitución de buses diésel por eléctricos permitiría una reducción significativa en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado, lo cual contribuiría directamente al cumplimiento de los objetivos de descarbonización y a la mejora de la calidad del aire en zonas urbanas.

La comparación entre vehículos de combustión interna y autobuses eléctricos deja en evidencia una marcada desventaja económica para los primeros, especialmente en lo relacionado con su consumo energético. La información recolectada demuestra que para las seis unidades diésel se estima un gasto anual de ₡231.205.680 colones en compra de diésel, sobre los ₡35.327.232 en compra de energía de sus similares eléctricos, (diferencia aproximada 200 millones de colones anuales).

En términos de costos de mantenimiento se puede percibir una diferencia anual de ₡96.602.112 de colones, lo cual se le debe brindar a las unidades de combustión interna únicamente, casi un 48% más que a las unidades eléctricas.

Un dato importante es que, con la propuesta de cambio tecnológico, impacta de manera tangible la conservación del ambiente, dado que no se utilizarían 409.213 litros de diésel por año y que a su vez evitaría la emisión de 1.32 toneladas de CO₂ anualmente.

En cuanto a la recuperación del capital invertido, tomando como criterio el valor de las ganancias anuales, se refleja que la flota diésel presenta una recuperación más rápida de la inversión y una mayor rentabilidad en el corto plazo, estos resultados están estrechamente vinculados con su menor inversión inicial. Sin embargo, a medida en que transcurre el tiempo, los mayores costos operativos y de mantenimiento tienden a reducir esa ventaja, lo cual afecta su eficiencia financiera en el largo plazo.

Se concluye que para la flotilla diésel, la inversión total se estaría recuperando en 3.5 años en condiciones óptimas de las unidades y un flujo constante de la demanda del servicio, en comparación con la flotilla eléctrica que presenta una recuperación de la inversión total en 1.8 años.

La comparación entre ambas tecnologías revela que, la flota de autobuses eléctricos se posiciona como una opción estratégica que no solo cumple con criterios de sostenibilidad, sino que también ofrece solidez financiera a largo plazo.

Recomendaciones

Desarrollar un plan piloto en la ruta San José – Alajuela, con una o dos unidades de movilidad eléctrica para validar el comportamiento real en condiciones diarias y ajustar aspectos operativos antes de una transición a mayor escala.

Gestionar alianzas con instituciones como el ICE, el MOPT y el MINAE para el diseño y financiamiento de la infraestructura de carga, aprovechando incentivos vigentes y fondos para movilidad sostenible.

Capacitar al personal técnico y operativo de TUASA en el uso, mantenimiento y gestión de flotas eléctricas, asegurando una transición eficiente.

Considerar la instalación de sistemas de respaldo eléctrico, para garantizar la continuidad operativa ante posibles interrupciones en el suministro eléctrico. Esta medida incrementa la confiabilidad del servicio y mitiga riesgos asociados a fallos energéticos imprevistos.

Implementar un plan de mantenimiento preventivo, especializado y orientado al monitoreo continuo del rendimiento de las baterías de las unidades eléctricas. Este plan debe contemplar la revisión periódica del sistema de enfriamiento, ya que su deterioro puede reducir significativamente la capacidad de desempeño y almacenamiento energético.

Implementar un enfoque de sostenibilidad integral que incluya la gestión responsable de la producción, uso y reciclaje de las baterías de litio, que ingresen al país.

BIBLIOGRAFÍA

Referencia citada

- Agüero., J., Pujol., R., y, Pérez., E. (2021). *Patrones de movilidad en transporte público en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica: desafíos e impactos*. Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.
<https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/8234>
- Alanazi, F. (2023). *Electric vehicles: Benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation*. *Applied Sciences*; 13(10): 6016.
<https://doi.org/10.3390/app13106016>
- Alcántara, N., Arizaga., C., y, Zúñiga., Y. (2023). *Las políticas públicas de transporte urbano sostenible y su relación con la calidad de vida urbana en los vecinos del distrito de San Borja – Lima*. (Tesis de maestría, Universidad Continental). Lima-Perú.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15374/1/IV_PG_MGP_TE_Alcantara_Arizaga_Zu%C3%B1iga_2023.pdf
- Alvear., W. (2019). *Diseño del sistema eléctrico en baja tensión para estaciones de carga de autobuses eléctricos*. (Universidad de Cuenca, Tesis de grado). Cuenca-Ecuador. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e03948d1-3301-4cfc-8f04-d95fea5f2edf/content>
- Alvear., W. (2019). *Diseño del sistema eléctrico en baja tensión para estaciones de carga de autobuses eléctricos* (Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Eléctrica). Cuenca.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32467>

Barrón, V. y D'Aquino, M. (2020). *Proyectos y metodologías de investigación*. Editorial Maipue. ISBN: 978-987-8321-71-4

Bejarano., A. (2020). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de centros de recarga para vehículos eléctricos en el Campus Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica*. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, Tesis de grado). Cartago.

[https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12316/TFG_Angie_Bejarano_G %C3 %B3mez.pdf?sequence=1](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12316/TFG_Angie_Bejarano_G%C3%B3mez.pdf?sequence=1)

Bicer, A. (2025). Electric cars in UK last as long as petrol and diesel vehicles, study finds. *Nature Energy*.

Carey, J. (2023). The other benefit of electric vehicles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(3): e2220923120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2220923120>

Díaz., J., Rivas., J., y, Allen, J. (2023). Análisis de perspectivas y políticas públicas enfocadas al transporte público eléctrico modalidad autobús en Costa Rica (2018-2022). *Revista Infraestructura Vial*; 25(44): 1-17. <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.54872>

Díaz., J., Rivas., J., y, Allen, J. (2023). *Análisis de perspectivas y políticas públicas enfocadas al transporte público eléctrico modalidad autobús en Costa Rica (2018-2022)*. *Revista Infraestructura Vial*; 25(44):1–25. <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.54872>

- Figuerola, E. (2018). Caracterización de la demanda por vehículos eléctricos en Santiago, Chile. (Tesis de grado, Universidad de Chile). Chile. [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/168045/Caracterizaci %c3 %b3n-de-la-demanda-por-veh %c3 %adculos-el %c3 %a9ctricos-en-Santiago-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/168045/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-demanda-por-veh%C3%ADculos-el%C3%A9ctricos-en-Santiago-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Figuerola., E. (2018). *Caracterización de la demanda por vehículos eléctricos en Santiago, Chile*. (Tesis de magíster, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil). Ç Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168045>
- González., A., Molina., R., López., A., y, López., G. (2022). La entrevista cualitativa como técnica de investigación en el estudio de las organizaciones *New Trends in Qualitative Research*; 14. <https://doi.org/10.36367/ntqr.14.2022.e571>
- Hernández, C., Figuerola, E. y Correa, L. (2018). Reposicionamiento de marca: el camino hacia la competitividad de las pequeñas y medianas empresas. *Revista Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(1), 33-46. <http://www.scielo.org.co/pdf/ridi/v9n1/2389-9417-ridi-9-01-33.pdf>
- Hernández, R y Mendoza, C. (2023). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. (ed-2). México: MAC GRAW HILL

- Krieger., L. (2024). *Ciudades inclusivas, sostenibles e inteligentes (CISI): Transición hacia la electromovilidad pública en Costa Rica: Insumos y propuestas* (LC/TS.2024/70). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48842>
- León Vilches, C. A. (2022). *Sistema de monitorización y control para cargadores eléctricos en vehículos eléctricos*. (Universidad de las Ciencias Informáticas, Tesis de grado). Cuba. https://repositorio.uci.cu/bitstream/123456789/10628/1/41-TD_9899_22.pdf
- Martínez., D., y, Hernández., M. (2019). *Análisis comparativo en el mercado de la empresa MATEPSA Estelí vs REMASA Estelí en el segundo semestre del año 2018* (Trabajo de seminario de graduación, Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM-Estelí). Repositorio Institucional UNAN. <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/11484/1/20098.pdf>
- McKerracher, C., O'Donovan, A., Soulopoulos, N., Grant, A., Lyu, J., Mi, S., Doherty, D., Fisher, R., Cantor, C., Yang, M., et al. (2022). *Electric Vehicle Outlook 2022*. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
- Meza, B., Y, Pariona, L. (2022). *Evaluación de la factibilidad económica para cambiar la actual flota de autobuses convencionales por autobuses eléctricos en el Corredor Rojo en la Ciudad Metropolitana de Lima mediante la técnica del Total Cost of Ownership en el periodo 2020-2030* (Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas). <https://doi.org/0000-0002-2990-5554>

- Michelena, G., Iannuzzi, P., y, Barafani, M. (2023). *Hacia una integración sostenible: El potencial de la electromovilidad en América Latina y el Caribe* (Nota técnica No. IDB-TN-2805). Banco Interamericano de Desarrollo, Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe (INTAL).
<https://doi.org/10.18235/0004871>
- Netzer., A. (2022). *Estudio de prefactibilidad técnico-financiero para la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos en el Tecnológico de Costa Rica*. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, Tesis de grado). Cartago.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/14269/TF9438_BIB309361_Aaron_Josue_Netzer_Hernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Olivares., J., Hernández., C., y, Jiménez., L. (2022). Movilidad urbana sostenible, una alternativa para la contaminación atmosférica en el Área Metropolitana de Guadalajara. *Revista de Ciencias Sociales*; 31(62):111–132.
<https://doi.org/10.20983/noesis.2022.2.7>
- Pariona., L., y, Bernardo., P. (2020). *Evaluación de la factibilidad económica para cambiar la actual flota de autobuses convencionales por autobuses eléctricos en el corredor rojo en la ciudad Metropolitana de Lima mediante la técnica del Total Cost of Ownership en el periodo del 2020-2030*. (Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)). Perú.
<http://hdl.handle.net/10757/661952>

Ramírez, C., y Ureña, C. (2021). *Buses eléctricos para Costa Rica! Aprendizajes de un proyecto piloto y recomendaciones para el escalamiento*. San José, Costa Rica, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU), Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE). Recuperado de: 7.Aprendizaje-de-un-Proyecto-Piloto-recom-para-escalamiento.pdf

Salas., K. (2023). *Estudio de prefactibilidad técnico-financiero basado en el análisis del costo del ciclo de vida útil para la implementación de un camión eléctrico de carga pesada en Boston Scientific de Costa Rica S. R. L.* (Instituto Tecnológico de Costa Rica, Tesis de grado). Heredia. <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14572>

Scacchi, D., Ruíz, M., Sobrero, F., y, Fernández., I. (s.f.). *Un instrumento de apoyo al emprendedurismo en Argentina: El facilitador de flujos de proyectos*. Universidad Nacional del Litoral. <https://digital.csic.es/handle/10261/20617>

Sustainable Mobility for All (2021). *Movilidad eléctrica sostenible: Componentes esenciales y recomendaciones de políticas*. Washington DC, Sustainable Mobility for All (SuM4All).

U.S. Department of Energy. (2023). *Electric Vehicle Benefits and Considerations*. https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_benefits.html

Villalba., I., Insa., R., Salvador., P., y Martínez., P. (2021). Un nuevo paradigma de la movilidad: El autobús eléctrico. *R-Evolucionando el transporte*; 2117-2127. <https://doi.org/10.36443/10259/6967>

Referencia consultada

Anónimo. (s. f.). *Motor MAN D0836*. An. MyMotorList.

<https://es.mymotorlist.com/motores/man/d0836/>

Becerra, L., Castillo, M., Galarza, S., Ibáñez, M., López, G., y, Núñez, A. (2021, enero). *Evaluación de resultados, lecciones aprendidas y provisión de recomendaciones técnicas para el despliegue de buses eléctricos*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) / Fundación CRUSA.

<https://minae.go.cr/energia/proyecto%20dando%20el%20salto%20a%20la%20movilidad%20ele%C2%B4ctrica/4.D6%20Assessment%20of%20results%20for%20e-bus%20deployment%20FINAL.pdf>

Cipoletta., G., y, Adamson, M. (2022). *Estudio de impacto económico de las inversiones y el financiamiento para el recambio de flota de autobuses sostenibles en Costa Rica* (LC/TS.2022/223). *Revista Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. <https://hdl.handle.net/11362/48538>

Macián, V., Tormos, B., Ballester, S., Chiner, J., Navarro, L., y, Giménez, A. (2023,). *Estudio comparativo de los costes de mantenimiento y consumo energético de diferentes tipologías de propulsión de autobuses*. *Revista AEM*. <https://revista.aem.es/noticia/estudio-comparativo-de-los-costes-de-mantenimiento-y-consumo-energetico-de-diferentes-tipologias-de-propulsion-de-autobuses>

Yutong. (2024). *Explora la seguridad, la autonomía y el rendimiento de la nueva generación de baterías para vehículos eléctricos.*

<https://es.yutong.com/la/technology/industry-insights/tec/2024/1862424605533278208.shtml>

ANEXOS

Anexo 1

UNIVERSIDAD CENTRAL

Instrumento número 1. Entrevista a los autobuseros del transporte público de la ruta San José - Alajuela (Grupo TUASA)

Mi nombre es Dago Steven Barrantes Fernández, estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Central.

La presente encuesta tiene como finalidad recabar información para el **“ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNIDADES ELÉCTRICAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE LA RUTA DE GRUPO TUASA SAN JOSÉ - ALAJUELA”**, correspondiente al segundo cuatrimestre del 2025. Este estudio pretende analizar los beneficios, desafíos y nivel de aceptación que podría tener la incorporación de buses eléctricos en dicha ruta.

A continuación, encontrará una serie de preguntas relacionadas con esta investigación. Su objetivo es conocer su perspectiva y experiencia como usuario o persona interesada en el tema. Toda la información recolectada será tratada de forma estrictamente confidencial y los resultados se presentarán de manera agregada, sin identificar a ningún participante individualmente.

Agradezco de antemano su colaboración y tiempo para responder esta encuesta.

Investigador: Dago Steven Barrantes Fernández.

I PARTE: INFORMACIÓN GENERAL DE LA PERSONA PARTICIPANTE

Género: Femenino () Masculino ()

II PARTE: RESPUESTAS DE LA ENTREVISTA DE ACUERDO CON LAS VARIABLES.

1. ¿Qué opinión tiene usted sobre la idea de implementar buses eléctricos en la ruta San José - Alajuela?

2. Desde su experiencia diaria como autobusero, ¿cuáles cree que serían los principales beneficios de utilizar buses eléctricos en esta ruta?

3. ¿Cuáles considera que serían los principales retos o dificultades al incorporar unidades eléctricas en la operación diaria?

4. ¿Cree que la infraestructura actual (paradas, estaciones, talleres) está preparada para recibir buses eléctricos? ¿Por qué?

5. ¿Ha recibido alguna capacitación o información por parte de la empresa sobre el uso de buses eléctricos? ¿Le interesaría recibirla?

6. ¿Considera que el rendimiento de los buses eléctricos podría ajustarse a las exigencias de la ruta San José - Alajuela, especialmente en horarios pico?

7. ¿Qué tan viable cree que es el mantenimiento de los buses eléctricos en comparación con los buses tradicionales?

8. ¿Cómo cree que reaccionaría el usuario (pasajero) habitual ante un cambio a buses eléctricos?

9. En su opinión, ¿qué condiciones mínimas deberían garantizarse antes de implementar buses eléctricos en la flota actual?

10. ¿Desea agregar algún comentario o sugerencia sobre el futuro del transporte público y la incorporación de tecnología más sostenible como la eléctrica?

11. ¿Cómo percibe usted el impacto ambiental que generan actualmente los autobuses tradicionales en la ruta San José - Alajuela, especialmente en cuanto a emisiones contaminantes como el CO₂? *Explique según su experiencia diaria como conductor y lo que observa en el entorno.*

12. ¿Qué cambios ambientales cree usted que podrían notarse si se reemplazaran progresivamente los autobuses tradicionales por unidades eléctricas? *Considere aspectos como el aire, el ruido y la calidad de vida en la ciudad.*

13. En su opinión, ¿cómo podría contribuir el uso de buses eléctricos a la construcción de un sistema de transporte más sostenible y respetuoso con el ambiente?

Explique desde su perspectiva profesional y cualquier conocimiento que tenga sobre el tema.

MUCHAS GRACIAS

Anexos 2
UNIVERSIDAD CENTRAL

Encuesta dirigida a usuarios o interesados en el transporte público de la ruta
San José - Alajuela (Grupo TUASA)

Mi nombre es Dago Steven Barrantes Fernández, estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Central.

La presente encuesta tiene como finalidad recabar información para el **“ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNIDADES ELÉCTRICAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE LA RUTA DE GRUPO TUASA SAN JOSÉ - ALAJUELA”**, correspondiente al segundo cuatrimestre del 2025. Este estudio pretende analizar los beneficios, desafíos y nivel de aceptación que podría tener la incorporación de buses eléctricos en dicha ruta.

A continuación, encontrará una serie de preguntas relacionadas con esta investigación. Su objetivo es conocer su perspectiva y experiencia como usuario o persona interesada en el tema. Toda la información recolectada será tratada de forma estrictamente confidencial y los resultados se presentarán de manera agregada, sin identificar a ningún participante individualmente.

Agradezco de antemano su colaboración y tiempo para responder esta encuesta.

Investigador: Dago Steven Barrantes Fernández

I PARTE: INFORMACIÓN GENERAL DE LA PERSONA PARTICIPANTE

Género: Femenino () Masculino () Otro ()

Indique el rango de edad en el que se encuentra

() 20-24

() 25-29

() 30-34

() 35-39

() 40-44

() 45-49

() Otro

1. ¿Con qué frecuencia utiliza usted el transporte público en la ruta San José - Alajuela?

a) A diario

b) Varias veces por semana

c) Una vez por semana

d) Rara vez

e) Nunca

2. ¿Cuál es su medio de transporte principal para movilizarse entre San José y Alajuela?

a) Autobús TUASA

b) Vehículo propio

c) Taxi / Uber / Didi

d) Bicicleta

e) Otro

3. ¿Está usted satisfecho(a) con el servicio actual que brinda el Grupo TUASA?

a) Muy satisfecho

b) Satisfecho

c) Neutral

d) Insatisfecho

e) Muy insatisfecho

4. ¿Está familiarizado(a) con el concepto de autobuses eléctricos?

a) Sí

b) No

5. ¿Considera usted que la implementación de unidades eléctricas en esta ruta mejoraría la calidad del servicio?

a) Sí

b) No

c) No sabe / No responde

6. ¿Qué tanto le preocupa el impacto ambiental del transporte público actual?

a) Mucho

b) Algo

c) Poco

d) Nada

7. ¿Estaría dispuesto(a) a pagar un poco más por un pasaje si esto implicara un transporte más limpio y eficiente?
- a) Sí
 - b) No
 - c) Depende del aumento
8. ¿Cree que el uso de autobuses eléctricos ayudaría a reducir la contaminación en la ruta San José - Alajuela?
- a) Sí
 - b) No
 - c) No está seguro
9. ¿Ha notado usted niveles elevados de ruido (bulla) generados por los autobuses actuales en la ruta San José - Alajuela?
- a) Sí, frecuentemente
 - b) A veces
 - c) Rara vez
 - d) No
10. ¿Le preocupa el nivel de emisiones de gases contaminantes (como CO₂) producido por los autobuses actuales de la ruta?
- a) Sí, mucho
 - b) Algo
 - c) Poco
 - d) No me preocupa

11. ¿Considera que los autobuses eléctricos podrían reducir significativamente el ruido y la contaminación del aire en la ruta San José - Alajuela?

- a) Sí
- b) No
- c) No está seguro

12. ¿Confía en que Grupo TUASA pueda gestionar de forma eficiente una flota de autobuses eléctricos?

- a) Sí
- b) No
- c) No tengo opinión

13. ¿Le gustaría que se implementaran otras tecnologías sostenibles en el transporte público costarricense?

- a) Sí
- b) No
- c) No sabe / No responde

14. ¿Qué beneficios o inconvenientes considera que tendría el uso de autobuses eléctricos en la ruta San José - Alajuela?

Gracias por su participación

Anexo 3

- ✓ Cálculo de selección de conductor por ampacidad de los ramales
- ✓ Consumo respectivo de cada cargador trifásico

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \rho}$$

$$I = \frac{160000}{\sqrt{3} \times 480 \times \cos 0.99}$$

$$I = 192.4A \times 1.25 \text{ carga continua} = 240.53 \text{ amperios}$$

Según el código eléctrico nacional en vigencia, en su tabla de nomenclatura 310.15(B)(16) Ampacidades permisibles en conductores aislados. Se selecciona el conductor respectivo al cálculo anterior.

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 TW, UF	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

Según el código eléctrico nacional en vigencia, en su apartado 240.6 Valores en amperes nominales normalizados, se selecciona el interruptor automático de 250 amperios.

Respecto al cable de tierra, su valor se obtiene de la tabla 250.122 Calibre mínimo de conductores de puesta a tierra. Cuyo valor hace referencia a utilizar un conductor calibre 4 AWG en cobre.

Selección del área de conducto

Según el código eléctrico nacional en vigencia, en su tabla 4 de nomenclatura Dimensiones y área porcentual de conductos. Se selecciona el conducto respectivo según el cálculo posterior.

$$250 \text{ kcmil} = 256.1 \text{ mm}^2 \times 3 = 768.3 \text{ mm}^2$$

$$\#4 \text{ AWG} = 53.16 \text{ mm}^2 \times 1 = 53.16 \text{ mm}^2$$

$$768.3 \text{ mm}^2 + 53.16 \text{ mm}^2 = 821.46 \text{ mm}^2 = \text{EMT } 2"$$

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

- ✓ Procedimiento para la selección del conductor y ducto para alimentadores aguas abajo del transformador.

El escenario de mayor demanda se estima al final de la jornada durante la noche cuando todas las unidades se encuentran cargándose en el plantel, por ello se suman las cargas demandadas.

$$I = 240.53A \times 3 = 721.59 \text{ amperios}$$

Según el código eléctrico nacional en vigencia, en su tabla de nomenclatura 310.15(B)(16) Ampacidades permisibles en conductores aislados. Se selecciona el conductor respectivo al cálculo anterior, con la condición de que se llevaran 2 conductores por fase. A estos se les debe aplicar el factor de ajuste para más de tres conductores portadores de corriente, tabla 310.15 (B)(3)(a).

Table 310.15(B)(16) (formerly Table 310.16) Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated Up to and Including 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)*

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(A).]						Size AWG or 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)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM			
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
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	350	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	315	375	425	700

Según el código eléctrico nacional en vigencia, en su apartado 240.6 Valores en amperes nominales normalizados, se selecciona el interruptor automático de 800 amperios.

Respecto al cable de tierra, su valor se obtiene de la tabla 250.122 Calibre mínimo de conductores de puesta a tierra. Cuyo valor hace referencia a utilizar un conductor calibre 1/0 AWG en cobre.

Selección del área de conducto

Según el código eléctrico nacional en vigencia, en su tabla 4 de nomenclatura Dimensiones y área porcentual de conductos. Se selecciona el conducto respectivo según el cálculo posterior.

$$700 \text{ kcmil} = 637.9 \text{ mm}^2 \times 6 = 3827.4 \text{ mm}^2$$

$$\#1/0 \text{ AWG} = 119.7 \text{ mm}^2 \times 1 = 53.16 \text{ mm}^2$$

$$3827.4 \text{ mm}^2 + 119.7 \text{ mm}^2 = 3947.1 \text{ mm}^2 = \text{Ducto } 6"$$

Anexo 4

- ✓ **Costos variables por concepto de mantenimiento mensual por unidad**
- ✓ **Costo por consumo de combustible**

$$CCC_r = ccc_y \times (1 + ccsr) \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PC$$

$$CCC_r = 0.47 \times (1 + 0.00) \times 40 \times (1 + 0.10) \times 240 \times 647$$

$$CCC_r = 3211190 \text{ colones} \times \text{mes}$$

- ✓ **Costo por consumo de aceite de motor**

$$CCAM_r = \frac{ccam_y}{fcam_y} \times (1 + ccsr) \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PAM$$

$$CCAM_r = \frac{30}{10000} \times (1 + 0.00) \times 40 \times (1 + 0.10) \times 240 \times 8000$$

$$CCAM_r = 219648$$

- ✓ **Costo por aceite de caja de cambios**

$$CCACC_r = \frac{ccacc_y}{facc_y} \times (1 + ccsr) \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PAC$$

$$CCACC_r = \frac{16}{50000} \times (1 + 0.00) \times 40 \times (1 + 0.10) \times 240 \times 9000$$

$$CCACC_r = 30412$$

✓ **Costo por consumo de filtros**

$$CCFC_r = \frac{ccfc_y}{fcfc_y} \times D_r \times (1 + cki) \times CM_r \times PF$$

$$CCFC_r = \frac{1}{16500} \times 40 \times (1 + 0.10) \times 240 \times 16000$$

$$CCFC_r = 10240$$

Anexo 5

SERVICIOS TÉCNICOS ELECTROMECAÑICOS

Ingeniería Picado Picado
Teléfono: 2256-4759
E-mail: plantaselectricasr@yahoo.es



Nº Cotización:
STE-623

Cliente: Dago Barrantes F.
Contacto: Dago Barrantes
Proyecto: Instalación de Acometida Eléctrica
Tiempo de Entrega: 8 semanas.

Fecha : 23/07/2025.
Cotización: # STE-623
Valida hasta: 23/08/2025.
Condiciones de Pago: Crédito 30 días.

Estimado Dago,

Reciba mediante la presente nuestro más cordial saludo. Adjuntamos nuestra propuesta técnica y económica para el suministro de:

Instalación de transformador y acometida eléctrica para estación de carga
CARACTERISTICAS DEL SERVICIO:

- Diseño y elaboración de planos eléctricos y de construcción.
- Ejecución de obra gris e instalación del transformador.
- Instalación de recloser media tensión.
- Diseño y construcción de malla a tierra.
- Conexión y pruebas respectivas para conductores y equipos.
- Supervisión y coordinación de proyecto.

Tabla de Precios:

Descripción	Cantidad	Precio
• Instalación de transformador y acometida eléctrica para estación de carga	1	\$34.800,00
• IVA	1	\$5.200,00
Total		\$40.000,00