

## INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

*“Estudio de prefactibilidad técnico-financiero en relación con el costo del ciclo de vida de los trenes en Costa Rica para una conversión a tren eléctrico ligero.”*

Trabajo Final de Graduación para optar por el título de  
Ingeniería en Mantenimiento Industrial  
con el grado académico de  
Licenciatura.

Realizado por:  
Jeycar Calderón Badilla

Cartago, noviembre, 2024



**Carrera evaluada y acreditada por:** Agencia de Acreditación de  
programas de Ingeniería y de Arquitectura



# Hoja de datos

## Datos personales

**Nombre completo:** Jeycar Calderón Badilla

**Número de cédula:** 117150786

**Número de carné:** 2018107871

**Números de teléfono:** 84912280

**Correo electrónico:** calderonjeycar@estudiantec.cr y calderonjeycar@gmail.com

**Dirección exacta de domicilio:** 25 metros Este y 25 metros Norte de la entrada del polideportivo La Suiza, Santiago, San Rafael, Heredia, Costa Rica.

## Datos de la empresa

**Nombre:** Fundación Centro para la Sostenibilidad Urbana (CPSU).

**Actividad Principal:** Proyectos de sostenibilidad urbana.

**Dirección:** Ave 1, calle 6. edificio San Gil, 4to piso, San José, Costa Rica.

**Contacto:** proyectos@cpsurbana.org

**Teléfono:** +506 8498-5181

# Carta de aceptación de la empresa



San José, jueves 25 de abril, 2024

Señor

Ing. Sebastian Mata Ortega,  
Coordinador de Práctica Profesional  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Estimado Ing. Mata:

Por este medio le extiendo un cordial saludo para comunicarle que, de parte de la **Fundación Centro para la Sostenibilidad Urbana (CPSU)**, aceptamos apoyar al estudiante **Jeycar Calderón Badilla**, número de cédula **1-1715-0786** y carné de estudiante **2018107871**, en la realización de su trabajo final de graduación para optar por el grado de **Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial**. Este trabajo de graduación lleva como nombre **Estudio de prefactibilidad técnico-financiero en relación con el costo del ciclo de vida de los trenes en Costa Rica para una conversión a tren eléctrico ligero**.

La propuesta del estudiante Jeycar Calderón Badilla se enfoca en analizar los trenes actuales en Costa Rica con el objetivo de evaluar su operación de manera más efectiva, considerando los costos asociados a las nuevas alternativas tecnológicas y sostenibles en movilidad. Este enfoque busca contribuir a la descarbonización del transporte, la reducción del consumo de hidrocarburos en el sistema de transporte y mejorar la eficiencia del transporte público.

El proyecto implica comparar los trenes actuales de combustión interna con un tren eléctrico ligero, mediante un análisis del costo del ciclo de vida, con el fin de promover la movilidad eléctrica y sostenible, y destacar sus ventajas y desventajas en comparación con la combustión. Se evaluarán los impactos sociales, financieros, ambientales y tecnológicos. Este trabajo es de relevancia para el CPSU debido a que se desenvuelve en dos áreas en las cuales la fundación tiene incidencia: la acción climática y la movilidad sostenible.

Consideramos que esta información puede ser del interés del público para alimentar la discusión sobre la electrificación de los trenes y fungir como aporte técnico en los proyectos futuros de la institucionalidad costarricense. Estamos interesados en que esta información pueda estar disponible para todas las personas que deseen consultarla y que se pueda presentar ante las organizaciones relevantes al transporte ferroviario.



Con base en esto, el Centro para la Sostenibilidad Urbana (CPSU), a través de mi apoyo, otorgamos la aprobación para que el estudiante Jeycar Calderón Badilla realice su trabajo final de graduación de la mano con nuestra organización.

Le agradezco de antemano por su atención y me despido cordialmente,

*Arturo Steinorth*

Ing. Arturo Steinorth Álvarez, MSc.

Coordinador de movilidad sostenible

Fundación Centro para la Sostenibilidad Urbana

Cédula 1-1344-0875

# Dedicatoria

*Dedico este trabajo especialmente a mi hermano, Yaid, por ser siempre mi mayor inspiración y admiración, quien, aunque no esté presente en vida, sé que me estuvo guiando en todo momento.*

*A mi mamá, Silvia, por su gran apoyo y amor incondicional, y a mi papá, Eliud, por impulsarme siempre a ser mejor persona; a ambos les dedico este trabajo porque, gracias a ellos, logré esta meta.*

*Le dedico a mis hermanos, Eliud y Mavi, por ser un gran ejemplo a seguir y a crecer como profesional.*

*A mis amigos y compañeros del TEC, por todo el acompañamiento, apoyo y por los excelentes momentos vividos que formaron gran parte de esta etapa como estudiante. Especialmente, sin algún orden en particular, le dedico este trabajo a: Aquim Williams, Alonso Alfaro, Joselyn Granados, Karina Rodriguez, Daniel Fernández, Esteban Madrigal, Freizer Cortés, Estefanny Villalta, Kenneth Yuen, Mónica Schmidt, Ricardo Campos, Daniel Camacho, Chloe Conejo, Alfonso Rodríguez, Kenneth Arce, Santiago Carballo, Sofia Barquero, Victor Céspedes, Angie Cubillo, Ignacio Calderón, Gregorio Riggioni, Gabrielle Witt, Paulina Fallas y Daniel Hernandez.*

# Agradecimientos

Quiero dar un profundo agradecimiento a mi familia, a mis amigos y familiares por su apoyo y por ser un gran impulso a seguir creciendo como persona y profesional.

Agradezco a Mayela Azofeifa por siempre estar dispuesta a apoyarme con cualquier situación relacionada al tiempo en la universidad, fue de gran ayuda en todo momento.

Al Tecnológico de Costa Rica, por darme la oportunidad de formarme como profesional y hacer realidad mi sueño en una institución de prestigio.

Un especial agradecimiento a mis profesores, Sebastián Mata Ortega, Carlos Piedra Santamaría y Rosa Matarrita Chaves, por su acompañamiento en todo momento, su dedicación, su disposición y, sobre todo, por creer en mí y en mis capacidades para lograr esta meta.

Agradezco a Arturo Steinvorth por darme la oportunidad de desarrollar el proyecto con la fundación Centro para la Sostenibilidad Urbana (CPSU), de igual manera a Andrea San Gil y a Pablo Castro por el apoyo como parte de la fundación.

Un agradecimiento a Elizabeth Briceño por ser de gran apoyo durante todo este proceso, por toda la ayuda y por todo lo que aprendí de ella.

De igual manera, a Isaac Gonzalez y al Incofer por toda la ayuda brindada y el conocimiento que me aportaron durante este trabajo.

Agradezco por la confianza y el apoyo de quienes fueron parte de este proceso, sin un orden en específico, agradezco a: Juan Sauma, Alan Blanco, Roy Gúzman, a Marco Coto y a Luis Valerio.

# Resumen

En Costa Rica, el sistema de transporte enfrenta importantes desafíos en términos de sostenibilidad, eficiencia energética y falta de opciones de transporte público masivo adecuadas para satisfacer la creciente demanda de movilidad. Los sistemas de trenes tienen el potencial de transformar positivamente el transporte de personas en el país. Sin embargo, los trenes actuales no satisfacen las necesidades de movilidad ni cumplen con los objetivos de sostenibilidad nacional, ya que los trenes de combustión interna generan altos costos de operación y contribuyen significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Este estudio de prefactibilidad técnico-financiero explora la conversión del sistema ferroviario en Costa Rica a trenes eléctricos ligeros, analizando modelos de trenes eléctricos viables y su infraestructura asociada. Se evaluaron los costos de ciclo de vida (CCV) de los trenes eléctricos y se compararon con los trenes de combustión interna, considerando costos de adquisición, operación, mantenimiento y descarte. En cuanto a la infraestructura, se analizaron las subestaciones y la capacidad eléctrica necesaria para implementar este sistema en el Gran Área Metropolitana (GAM).

Los resultados muestran una ventaja significativa para los trenes eléctricos en términos de reducción de costos a largo plazo y menor impacto ambiental, con una disminución sustancial en las emisiones de y beneficios para la salud pública. Este análisis destaca el potencial económico y ambiental de esta transición, proporcionando una base sólida para un sistema de transporte más sostenible y eficiente en Costa Rica.

**Palabras clave:** Transporte ferroviario, trenes eléctricos, costo del ciclo de vida (CCV), movilidad sostenible, infraestructura ferroviaria, impacto ambiental.

# Abstract

In Costa Rica, the transportation system faces significant challenges in terms of sustainability, energy efficiency, and a lack of adequate public mass transit options to meet the growing mobility demands of the population. Rail systems have the potential to positively transform passenger transportation in the country. However, the current trains do not meet Costa Rica's mobility needs nor align with its sustainability goals, as internal combustion trains generate high operating costs and significantly contribute to greenhouse gas (GHG) emissions.

This technical and financial prefeasibility study explores the conversion of Costa Rica's railway system to light electric trains, analyzing viable electric train models and their associated infrastructure. Life Cycle Costs (LCC) of electric trains were evaluated and compared to those of internal combustion trains, considering acquisition, operation, maintenance, and disposal costs. Regarding infrastructure, substations and the necessary electrical capacity to implement this system in the Greater Metropolitan Area (GAM) were analyzed.

The results show a significant advantage for electric trains in terms of long-term cost reduction and lower environmental impact, with a substantial decrease in CO emissions and benefits for public health. This analysis highlights the economic and environmental potential of this transition, providing a solid foundation for a more sustainable and efficient transportation system in Costa Rica.

**Keywords:** Rail transport, electric trains, life cycle cost (LCC), sustainable mobility, railway infrastructure, environmental impact.

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Reseña de la empresa</b>	<b>2</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>3</b>
Teóricos . . . . .	3
Prácticos . . . . .	4
<b>Planteamiento del problema</b>	<b>6</b>
<b>Objetivos</b>	<b>8</b>
Objetivo general . . . . .	8
Objetivos específicos . . . . .	8
<b>Justificación</b>	<b>9</b>
<b>Alcance</b>	<b>11</b>
<b>Viabilidad</b>	<b>12</b>
<b>Administración del riesgo</b>	<b>13</b>
<b>Marco teórico</b>	<b>14</b>
<b>Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto</b>	<b>21</b>
<b>Metodología por seguir</b>	<b>23</b>
<b>Análisis de resultados</b>	<b>25</b>
Objetivo 1. . . . .	25
Características operativas generales. . . . .	25
Características técnicas. . . . .	27
Comparación de tren eléctrico ligero. . . . .	30
Escogencia de tren eléctrico ligero. . . . .	42

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
Objetivo 2. . . . .	45
Aspectos generales. . . . .	45
Consideraciones del tren eléctrico. . . . .	46
Estudio de instalaciones eléctricas en proyectos de otros países. . . . .	46
Instalación eléctrica preliminar para una eventual implementación del tren eléctrico ligero. . . . .	51
Objetivo 3. . . . .	60
DMU Apolo 2400. . . . .	60
DMU para Costa Rica. . . . .	64
Trenes eléctricos. . . . .	67
Análisis del costo del ciclo de vida (ACCV). . . . .	76
Objetivo 4. . . . .	82
Impacto Ambiental. . . . .	82
Impacto a la salud. . . . .	91
<b>Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>94</b>
Conclusiones. . . . .	94
Recomendaciones. . . . .	95
<b>Bibliografía</b>	<b>102</b>
Apéndices . . . . .	103

# Índice de figuras

1. Coste total de propiedad de la propulsión en locomotoras de diésel y eléctricos con baterías en un rango de 20 años . . . . .	4
2. Costos y beneficios por año con una tendencia acumulativa del VAN . . . . .	5
3. Frecuencia de casos por sectores prioritarios en mitigación. . . . .	9
4. Diagrama de bloques de una locomotora eléctrica AC . . . . .	15
5. Configuraciones comunes de los trenes. . . . .	16
6. Diagrama de Gantt del cronograma. . . . .	21
7. Rutas actuales del tren de pasajeros en el GAM . . . . .	26
8. Gráfico del comportamiento de cantidad de pasajeros por año. . . . .	27
9. Diagrama Feve Serie 2400 . . . . .	28
10. Diagrama DMU para Costa Rica . . . . .	30
11. Urbos 100 en la ciudad de Oslo . . . . .	43
12. Avenio-Siemens en la ciudad de Munich. . . . .	44
13. Trazado general y puntos de referencia del tren interurbano en Costa Rica. . . . .	45
14. Esquema ubicaciones elementos línea Bobadilla-Algeciras. . . . .	47
15. Valores de consumo locomotora S-130 RENFE . . . . .	48
16. Relación de potencias por subestación rectificadora en la línea de tranvía en Cuenca, Ecuador. . . . .	49
17. Interconexión de las S/Er y su alimentación desde S/E de la Centrosur. . . . .	49
18. Elementos de interconexión entre la subestación y la unidad de tracción del tranvía de Cuenca, Ecuador. . . . .	50
19. Diagrama simplificado de la TSS. . . . .	51
20. Esquema eléctrico de potencia común para trenes eléctricos ligeros. . . . .	52
21. Perfil de elevación de la ruta San José-Alajuela. . . . .	55
22. Perfil de elevación de la ruta San José-San Antonio de Belén. . . . .	56
23. Perfil de elevación de la ruta Cartago-San José. . . . .	57
24. Diagrama eléctrico general de la instalación preliminar. . . . .	58
25. Litros de diésel por año del modelo Apolo 2400. . . . .	61
26. Consumos energéticos aproximados del modelo Avenio-Siemens. . . . .	68
27. Consumos energéticos aproximados del modelo Urbos-CAF. . . . .	69
28. Kilómetros por año estimados en el estudio del Tren Rápido de Pasajeros del GAM. . . . .	71

29. Porcentaje de reciclaje del modelo Avenio-Siemens. . . . .	74
30. Porcentaje de reciclaje del modelo Urbos-CAF. . . . .	75
31. Gráfico representativo de la comparación entre el modelo Avenio y el DMU para Costa Rica. . . . .	77
32. Gráfico representativo de la comparación entre el modelo Urbos y el DMU para Costa Rica. . . . .	79
33. Gráfico representativo de la comparación entre el modelo Apolo 2400, el Avenio y el Urbos. . . . .	81
34. Contribución sectorial a la Carbonización en Costa Rica. . . . .	83
35. Porcentaje de emisiones de CO <sub>2</sub> según el tipo de vehículo en el 2010. . . . .	84
36. Niveles sonoros promedio identificados en las estaciones de estudio. . . . .	86
37. Composición de materiales del tren modelo Urbos-CAF. . . . .	87
38. Composición de materiales del tren modelo Avenio-Siemens. . . . .	87
39. Gráfico comparativo de las emisiones de toneladas de CO <sub>2</sub> por año para cada modelo. . . . .	90
40. Gráfico comparativo del potencial del calentamiento global para cada uno de los trenes. . . . .	90
41. Gráfico comparativo de las emisiones del ruido. . . . .	91
42. Mapa de las rutas del tren rápido de pasajeros. . . . .	103

# Índice de tablas

1.	Desviación entre debiera y realidad. . . . .	7
2.	Actividades por realizar durante el proyecto. . . . .	22
3.	Metodología por emplear en el desarrollo del proyecto. . . . .	24
4.	Recorridos y distancias de la línea férrea del tren de pasajeros en el GAM. . . . .	25
5.	Cantidad de pasajeros al año . . . . .	26
6.	Distancias aproximadas que recorren los dos tipos de trenes de pasajeros en el GAM. . . . .	27
7.	Características técnicas de los trenes tipo Apolo Serie 2400 . . . . .	28
8.	Características técnicas de los trenes DMU para Costa Rica. . . . .	29
9.	Resumen de las características técnicas promedio de ambos trenes de combustión interna. . . . .	30
10.	Características generales del tranvía articulado Avenio-Siemens . . . . .	31
11.	Características específicas de diferentes tranvías Avenio en varios países. . . . .	31
12.	Características generales del tren Flexity-Alstom. . . . .	32
13.	Características específicas de diferentes trenes FLEXITY en varios países. . . . .	33
14.	Características generales de los trenes Citadis Dualis del fabricante Alstom. . . . .	34
15.	Características específicas de casos reales de los trenes Citadis Dualis. . . . .	35
16.	Características específicas de casos reales de los trenes Urbos de la fabricante CAF. . . . .	36
17.	Características específicas de casos reales de los trenes Citylink de la fabricante Stadler. . . . .	37
18.	Características específicas de casos reales de los trenes S70 de la fabricante Siemens. . . . .	39
19.	Costos de adquisición de una unidad de tren ligero en diferentes ciudades según su modelo. . . . .	41
20.	Distancias totales de las vías férreas del tren de pasajeros en la GAM. . . . .	45
21.	Pesos totales de los modelos en vacío con capacidad de pasajeros máxima. . . . .	46
22.	Potencia máxima de cada modelo. . . . .	46
23.	Potencia máxima por subestación (SJO-ALA) . . . . .	56
24.	Potencia máxima por subestación (SJO-BEL) . . . . .	56
25.	Potencia máxima por subestación (SJO-CAR) . . . . .	57
26.	Costo de adquisición Apolo 2400. . . . .	60
27.	Costos operativos por 20 años del modelo Apolo 2400 . . . . .	61
28.	Costos de mantenimiento del modelo Apolo 2400 del año 2021. . . . .	62
29.	Costos de mantenimiento del modelo Apolo 2400 en su ciclo de vida de 20 años. . . . .	62
30.	Valor final del ciclo de vida respecto al porcentaje de depreciación. . . . .	63

31. Costo del ciclo de vida para los trenes Apolo 2400. . . . .	64
32. Costo de adquisición modelo DMU para Costa Rica 3100. . . . .	64
33. Costo de combustible del modelo DMU para Costa Rica 3100. . . . .	64
34. Costo de AdBlue del modelo DMU para Costa Rica 3100. . . . .	65
35. Costos totales de operación del modelo DMU para Costa Rica 3100. . . . .	65
36. Resumen de los costos anuales de mantenimiento preventivo del tren DMU para Costa Rica. . . . .	65
37. Resumen de los costos de mantenimiento por unidad del tren DMU para Costa Rica. . . . .	66
38. Costo de descarte del tren DMU para Costa Rica 3100. . . . .	66
39. Costo de ciclo de vida útil del modelo DMU para Costa Rica 3100. . . . .	67
40. Costos de adquisición para los dos modelos de trenes eléctricos seleccionados. . . . .	67
41. Kilómetros recorridos por día del DMU para Costa Rica. . . . .	68
42. Kilómetros por año del DMU para Costa Rica. . . . .	68
43. Consumo energético preliminar para el modelo Avenio-Siemens. . . . .	69
44. Consumo energético preliminar para el modelo Urbos-CAF. . . . .	69
45. Consumo energético preliminar en 20 años de los modelos Avenio-Siemens y Urbos-CAF. . . . .	70
46. Costo total de mantenimiento por unidad del estudio realizado por IDOM en el 2018. . . . .	71
47. Costo total de mantenimiento por unidad de tren eléctrico ligero considerando un servicio de 16 unidades en las rutas actuales del 2024. . . . .	71
48. Costo total de mantenimiento por unidad de tren eléctrico ligero en un plazo de 20 años. . . . .	72
49. Costo de descarte del modelo Avenio-Siemens. . . . .	73
50. Costo de descarte del modelo Urbos-CAF. . . . .	74
51. Costo del ciclo de vida de 20 años del modelo Avenio-Siemens. . . . .	75
52. Costo del ciclo de vida de 20 años del modelo Urbos-CAF. . . . .	75
53. Comparación entre los costos del ciclo de vida del Avenio contra el DMU para Costa Rica. . . . .	76
54. Ahorro en los diferentes costos del ciclo de vida de 20 años del Avenio con el DMU para Costa Rica. . . . .	77
55. Tasa interna de retorno (TIR) para el modelo Avenio-Siemens en comparación con el costo de oportunidad. . . . .	78
56. Comparación entre los costos del ciclo de vida del Urbos contra el DMU para Costa Rica. . . . .	78
57. Ahorro en los diferentes costos del ciclo de vida de 20 años del Urbos contra el DMU para Costa Rica. . . . .	79
58. Tasa interna de retorno (TIR) para el modelo Urbos-CAF en comparación con el costo de oportunidad. . . . .	80
59. Comparación entre los costos del modelo Apolo 2400, el Avenio y el Urbos. . . . .	80
60. Ahorro en el costo de operación y mantenimiento de los Apolo contra los Avenio y Urbos. . . . .	81
61. Emisiones de toneladas de CO <sub>2</sub> liberadas al año del DMU para Costa Rica. . . . .	84
62. Emisiones anuales de CO <sub>2</sub> por pasajero generadas por el tren DMU para Costa Rica. . . . .	85
63. Emisiones de gramos de CH <sub>4</sub> liberadas al año del DMU para Costa Rica. . . . .	85
64. Emisiones anuales de CH <sub>4</sub> por pasajero generadas por el tren DMU para Costa Rica. . . . .	85
65. Emisiones de gramos de N <sub>2</sub> O liberadas al año del DMU para Costa Rica. . . . .	85

66.	Emisiones anuales de N <sub>2</sub> O por pasajero generadas por el tren DMU para Costa Rica. . . .	86
67.	Potencial del Calentamiento Global (GWP) por pasajero del tren DMU para Costa Rica.	86
68.	Emisiones de CO <sub>2</sub> eq del tren Avenio-Siemens . . . . .	88
69.	Emisiones de CO <sub>2</sub> por pasajero del tren Avenio-Siemens . . . . .	88
70.	Potencial del Calentamiento Global (GWP) por pasajero del tren Avenio-Siemens. . . . .	88
71.	Emisiones de CO <sub>2</sub> del tren Urbos-CAF. . . . .	88
72.	Emisiones de CO <sub>2</sub> por pasajero del tren Urbos-CAF. . . . .	89
73.	Potencial del Calentamiento Global (GWP) por pasajero del tren Urbos-CAF. . . . .	89
74.	Emisiones de ruido de ambos modelos de trenes eléctricos: Avenio-Siemens y Urbos-CAF.	89
75.	Costos no asumidos debido al deterioro del transporte. . . . .	92
76.	Costos sociales al año asociados a las emisiones de gases de CO <sub>2</sub> por cada modelo de tren.	92
77.	Consumo energético de los trenes evaluados por kilómetro. . . . .	93
78.	Ahorro energético de los trenes eléctricos en comparación con los trenes de combustión interna. . . . .	93

# Siglas y acrónimos

**ODS:** Objetivos de Desarrollo sostenible.

**ONG:** Organización no gubernamental.

**GAM:** Gran Área Metropolitana.

**INCOFER:** Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

**ACCV:** Análisis del costo del ciclo de vida.

**PIB:** Producto interno bruto.

**GEI:** Gases de efecto invernadero.

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono.

**kWh:** Kilovatio-hora.

**TKM:** Tonelada transportada por kilómetro.

**MtCO<sub>2</sub>:** Toneladas métricas de dióxido de carbono.

**VAN:** Valor actual neto

**EU-27:** Unión europea conformada por 27 países

**CNUMAD:** Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.

**CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

**ARESEP:** Autoridad reguladora de los servicios públicos.

**CR:** Costa Rica

**EPD:** Declaración ambiental de producto (Environmental Product Declaration).

**CH<sub>4</sub>:** Metano.

**N<sub>2</sub>O:** Óxido nitroso.

**t CO<sub>2</sub>/L:** Toneladas de CO<sub>2</sub> por litro.

**g CH<sub>4</sub>/L:** Gramos de metano por litro.

**LRV:** Vehículo férreo liviano (Light Rail Vehicle).

# Introducción

El transporte en Costa Rica enfrenta una situación crítica de estancamiento, debido al énfasis en el transporte privado, lo que afecta social, económica y ambientalmente y conlleva a un desarrollo urbano atrasado. La situación impacta con mayor gravedad en la zona del Gran Área Metropolitana (GAM), donde más de 2.5 millones de personas utilizan algún medio de transporte. Este problema genera un desbalance en la productividad del país, que resulta en pérdidas, ineficiencia y baja calidad de vida [1]. En otras ciudades del mundo, como es el ejemplo de Lyon, Francia, o varias urbes de Australia, se ha demostrado la importancia de la mejora continua de los servicios de transporte masivos y la modernización de estos para alcanzar un desarrollo sostenible que mejore el crecimiento de los distintos países [2].

Una modernización de los trenes en Costa Rica traería grandes beneficios tanto económicos como de desarrollo humano, lo que conllevaría a un impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los que destacan los relacionados con ciudades y comunidades sostenibles, energía asequible y no contaminante, así como otros mencionados más adelante. Una de las principales metas del *Plan Nacional de Descarbonización* del país es modernizar el transporte público para lograr una reducción efectiva de emisiones contaminantes; para ello, el plan se centra en la actualización del transporte público hacia un sistema de movilidad sostenible por lo que se contempla la implementación de un tren eléctrico dentro del GAM [3]. Por otra parte, Costa Rica cuenta con el *Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030* en el cual se establecen objetivos para disminuir el uso de hidrocarburos [4]; en dicho plan se incluye un enfoque hacia los trenes eléctricos para centralizar el transporte y evitar el uso de hidrocarburos.

Con el fin de evidenciar cuál es el impacto que los trenes eléctricos tendrían en el transporte público de Costa Rica, el presente estudio evalúa la prefactibilidad de un sistema de trenes de esta naturaleza mediante un análisis del costo del ciclo de vida (ACCV), con el objetivo de evaluar si es factible mejorar las líneas férreas actuales para poner en marcha un tren eléctrico ligero. El estudio involucra el análisis de costos totales incurridos en su vida de uso con respecto a la inversión de un sistema eléctrico moderno, para la toma de decisiones acorde a los resultados y las necesidades que conducen al país a cumplir con los compromisos internacionales adquiridos en el 2015 [5].

Este estudio brinda resultados claros que responden al cuestionamiento de un cambio de trenes de combustión a trenes eléctricos debido a que abarca, no solo la parte financiera, sino también el componente técnico correspondiente a la gestión de la energía de los trenes, construcciones mecánicas de estos y el estudio del mantenimiento que se le brinda a este tipo de sistemas. Estos estudios proporcionan los resultados necesarios para identificar los beneficios tanto para la institución encargada de los sistemas ferroviarios en el país –el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER)– como para el sistema de transporte urbano en general en Costa Rica.

Para el desarrollo de una investigación de esta naturaleza que contempla una conversión de los trenes de combustión a eléctricos, se requiere de una gran cantidad de información de diferentes instituciones en el país, y de un exhaustivo estudio para la recolección de datos con respecto a trenes eléctricos ligeros, además de la evaluación de una locomotora eléctrica en específico con todo su sistema de empuje y cantidad de vagones que se utilizaría. La búsqueda de información y datos certeros representa un desafío, por lo que, en la realización del estudio, se contemplarán con márgenes de error; sin embargo, la validación de los datos se corroborará mediante resultados teóricos.

# Reseña de la empresa

La Fundación Centro para la Sostenibilidad Urbana (CPSU) es una organización no gubernamental (ONG) que busca fortalecer las ciudades y comunidades de países en vías de desarrollo, fomentando modelos sostenibles, resilientes e inclusivos. El CPSU enfoca sus acciones en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), principalmente en el objetivo número once que se centra en ciudades y comunidades sostenibles. Aunque ese sea su principal enfoque, la organización también incide en múltiples aspectos de otros objetivos.

Debido a que el CPSU es una organización no gubernamental, su sistema de producción se basa en el bien social. En este sentido, no da un producto como tal, sino que basa sus acciones en ayudar a diferentes instituciones gubernamentales o incluso otras no gubernamentales, para trabajar en conjunto en la búsqueda de ciudades más sostenibles basadas en los ODS.

La fundación tiene cuatro ejes de acción que orientan su servicio, los cuales corresponden a asesoría, acción social, investigación y desarrollo, y capacitación y entrenamiento. Su accionar se da gracias a los esfuerzos de profesionales capacitados en la sostenibilidad, cambio climático, estrategias de desarrollo bajo en emisiones, ecoeficiencia, desarrollo de política pública, energías limpias, entre otras áreas de experticia.

Son diversas las maneras en que la organización trabaja en pro de estos cuatro ejes de acción. En cuanto a la asesoría, se brinda acompañamiento a diferentes instituciones, principalmente del Estado, de tal manera que se les pueda guiar en temas de sostenibilidad dentro de sus instituciones, principalmente en aquellas que tienen gran incidencia en el desarrollo urbano. La acción social facilitada por la empresa se basa en el desarrollo de proyectos que benefician a los ciudadanos por medio de sus comunidades. En el área de investigación y desarrollo, los expertos dan su servicio de estudio y análisis para dar resultados concisos sobre el desempeño sostenible de esas instituciones. Por último, la empresa realiza esfuerzos para impartir charlas, talleres, u otras estrategias educativas con tal de proporcionar conocimientos en cuanto a desarrollo sostenible a las comunidades.

La organización no tiene domicilio como tal, sin embargo, se utiliza como dirección Avenida 1, calle 6, edificio San Gil, 4to piso, San José, Costa Rica.

# Antecedentes

## Teóricos

El transporte es uno de los pilares más importantes para el desarrollo y crecimiento de un país, de él depende la mayoría de las personas que necesitan moverse diariamente de un sector a otro por motivos de trabajo, educación, servicios, ocio, entre otros [1]. Las grandes ciudades del mundo y, principalmente, las capitales requieren de sistemas de transporte altamente estructurados para poder sustentar la economía tanto de la ciudad como del país al que pertenecen. Esto se puede evidenciar con el ejemplo del metro de Nueva York, el cual es conocido por ser uno de los sistemas de transporte más grandes del mundo. No obstante, este ha sido históricamente conocido por generar pérdidas que, con los años, han alcanzado una cifra de alrededor de doscientos cincuenta millones de dólares, pero sin este servicio, ocho millones de personas que utilizan este medio de transporte verían gravemente afectada su economía [6].

En Costa Rica, cerca de 2.5 millones de personas utilizan un medio de transporte diariamente [1]; para 2011, esto generaba alrededor de 83 000 empleos dentro del GAM [7]. Lo anterior refleja en gran medida la importancia que un país debe dar al transporte; empero, Costa Rica ha optado por el crecimiento de las vías para el transporte por carreteras, creando una dependencia mayor al vehículo. Dicho enfoque genera congestión en las carreteras y afecta cada vez más el transporte de todas las personas que se movilizan diariamente en el país y, por ende, trae desventajas económicas. El sistema de transporte ineficiente y centralizado en el vehículo privado cuesta a Costa Rica cerca del 10% del PIB, lo que se traduce en impactos negativos en la salud, congestión vehicular, desperdicio de combustible y pérdidas en productividad [1].

La movilidad y economía del país dependen en gran medida del sistema de transporte público, el cual se encuentra obsoleto, y las acciones para solventarlo han sido obstaculizadas por el enfoque centrado en la movilidad en carreteras para vehículos privados, ignorando los beneficios de los sistemas de transporte masivo. En cambio, otros países con mayor desarrollo en movilidad han optado por mejorar la eficiencia en el uso del territorio, más que por el aumento de los sistemas de carretera ya existentes [1], lo que ha evidenciado que las grandes áreas metropolitanas deben buscar soluciones en otros tipos de transporte, en lugar de intentar mejorar el sistema actual por simple practicidad.

Los trenes en el país han sido parte de ese servicio de transporte que ayuda a mejorar el traslado de personas de una provincia a otra. A pesar de ello, el sistema de trenes actualmente no impacta significativamente en el mejoramiento del transporte para solventar esa ineficiencia, debido a rutas poco provechosas y a la obsolescencia de las vías y locomotoras [8].

El *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030* de Costa Rica busca utilizar de manera eficiente la energía del país, y brinda objetivos y acciones claras de las rutas que se deberían seguir para garantizar un mejor uso de la energía. En el capítulo de "Diagnóstico del sector transporte y combustibles", se menciona que el sector de transporte es responsable de la emisión del 54% de los gases de efecto invernadero (GEI) en Costa Rica, y que más del 40% de estos se originan debido al transporte privado de vehículos particulares, mientras que solo el 7% aproximadamente proviene del transporte público [9]. Por otra parte, el consumo de hidrocarburos en toda la matriz energética del país está dominado por el sector de transporte, con más del 75% del total; y en cuanto a consumo de energía, este consume más del 50% [9].

Los trenes de combustión interna, principalmente los que funcionan con diésel, tienen costos operativos más elevados en cuanto a mantenimiento, combustible, emisiones de CO<sub>2</sub>, comparados con los trenes eléctricos. En la Figura 1, se observa un ejemplo del costo de operación de dos tipos de locomotoras: una con batería eléctrica y otra con motor diésel, ambas con una potencia de 3.3 MW y que transporten una carga de 1,090 toneladas durante un período de 20 años de operación. Se observa una diferencia clara en los costos, con una discrepancia total que se aproxima a los US\$4 millones, siendo más económica la locomotora con batería eléctrica en este caso [10]. Este estudio pone en evidencia el beneficio, tanto a nivel ambiental como económico, que trae el uso de alternativas eléctricas por encima de la combustión de hidrocarburos para trenes.

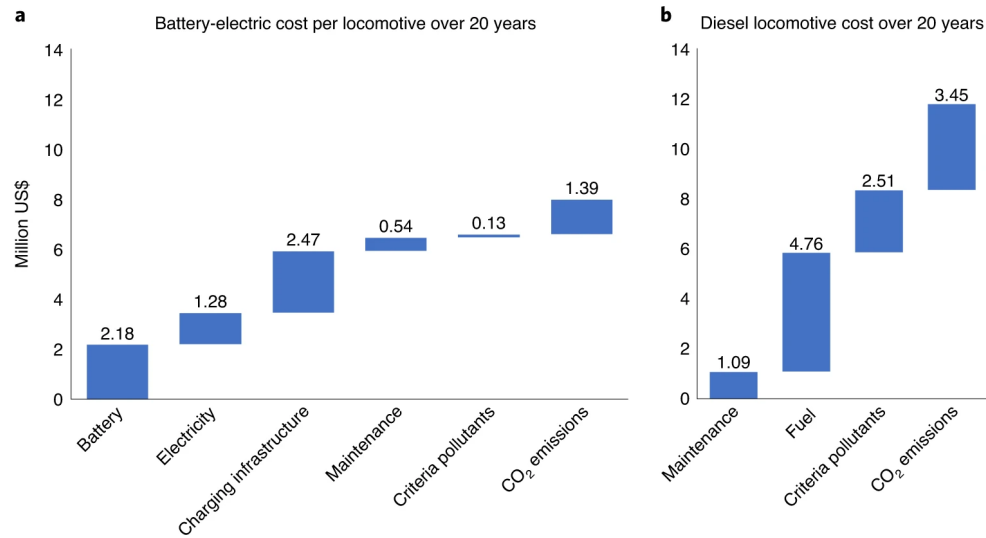


Fig. 1. Coste total de propiedad de la propulsión en locomotoras de diésel y eléctricos con baterías en un rango de 20 años [10].

La tracción eléctrica de trenes es una alternativa que trae ventajas para el sistema de transporte del país donde se elija, entre ellas se pueden mencionar la notable independencia de los combustibles fósiles, lo cual trae beneficios medioambientales al no haber emisiones de CO<sub>2</sub> de parte de la locomotora. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, el cuidado requerido por estos equipos es mucho menor que el de las locomotoras de combustión interna, lo cual disminuye considerablemente los costos de mantenimiento y los hace más rentables. Otra ventaja que presenta la tracción eléctrica es la relación entre potencia y peso, ya que esto reduce la cantidad de unidades necesarias para transportar los vagones, mejora aceleración debido al torque generado en los motores eléctricos, y también aumenta el límite de velocidad de la locomotora [11].

## Prácticos

Alrededor del mundo, el uso de trenes eléctricos se ha implementado como una alternativa más eficiente y económica. Existen datos que pueden evidenciar esta ventaja que tienen los trenes eléctricos en comparación con los de combustión. Un pequeño estudio que evaluó una herramienta para realizar dicha comparación arrojó resultados positivos para los trenes eléctricos. En dicho análisis, se comparó el consumo por unidad locomotora, determinando que el costo promedio por kWh para una locomotora eléctrica promedio en varios países europeos era de aproximadamente 0,09 euros, mientras que el costo por litro de combustible para los trenes de combustión era de 1,7 euros. Se estableció, además, un consumo de 5

kWh por cada tonelada transportada por kilómetro (TKM) para los trenes eléctricos, mientras que, para la locomotora de diésel, se consume un total de 0,45 litros por TKM [12].

Por lo tanto, si se transporta una tonelada en un tren eléctrico promedio en Europa, esta cuesta 0,45 euros; sin embargo, una tonelada transportada por una locomotora de diésel cuesta cerca de 0,76 euros. Ahora bien, como costo operativo, se determinó también el costo de mantenimiento, el cual es de 2,5 euros por TKM para la locomotora eléctrica, mientras que, para la locomotora de diésel, corresponde a 3,5 euros por TKM [12].

Otro estudio, realizado en el Reino Unido, demuestra las reducciones de emisiones generadas al reemplazar los trenes de combustión. En este estudio, se compararon trenes de hidrógeno, eléctricos y de diésel en el contexto de la ruta de carbono neutral del Reino Unido, tomando en cuenta las fuentes de energía de los trenes eléctricos y de hidrógeno de la red eléctrica nacional (*National Grid*). Primeramente, se obtuvo datos que representan la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida por los trenes de combustión en el Reino Unido, la cual fue de 2.870,2 gCO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido sobre rieles, lo que, según se menciona en el estudio, equivale a alrededor de 1,5 toneladas métricas de dióxido de carbono (MtCO<sub>2</sub>) [13]. En relación con los trenes eléctricos, para un escenario óptimo que busca reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 80% para bajar la temperatura ambiental en 2 °C para el año 2050, tal como propone el Acuerdo de París, las proyecciones indican una emisión de 0,35 MtCO<sub>2</sub> para el 2024, lo cual significa una diferencia considerable con respecto a los de combustión, pero se debe recalcar que es un escenario muy optimista, mas no tan lejano a la realidad. Por último, se brindan las proyecciones de emisiones de CO<sub>2</sub> en los trenes de hidrógeno, las cuales se estimaron a un 1,5 MtCO<sub>2</sub> en ese mismo escenario para 2024, lo cual evidencia emisiones incluso superiores de CO<sub>2</sub> en los trenes de hidrógeno [13].

Como se comentó anteriormente, los beneficios que la inversión en trenes eléctricos podría traer a Costa Rica son abundantes, y otros países lo han demostrado. En Inglaterra, los esfuerzos para descarbonizar el país cada vez son mayores y los beneficios de tales acciones abarcan muchas áreas. Parte de esa descarbonización en Inglaterra ha incluido la reestructuración de las líneas férreas para una conversión a trenes eléctricos. A causa de estos cambios de tracción en el transporte de trenes, las personas usuarias y no usuarias en el país se benefician por una disminución significativa en los GEI, siendo esta la mayor ventaja que trae ese cambio. Además, los tiempos de viaje se reducen, se descongestionan las carreteras y los costos totales de operación se ven beneficiados en un 19.8% [14]. En la Figura 2, se pueden comparar las ventajas a futuro con los costos que representan el capital inicial, la puesta en marcha y los años operativos; se observa que los beneficios económicos superan ampliamente los costos, lo que resulta en un ajuste favorable del valor actual neto (VAN) y demuestra la rentabilidad de la inversión.

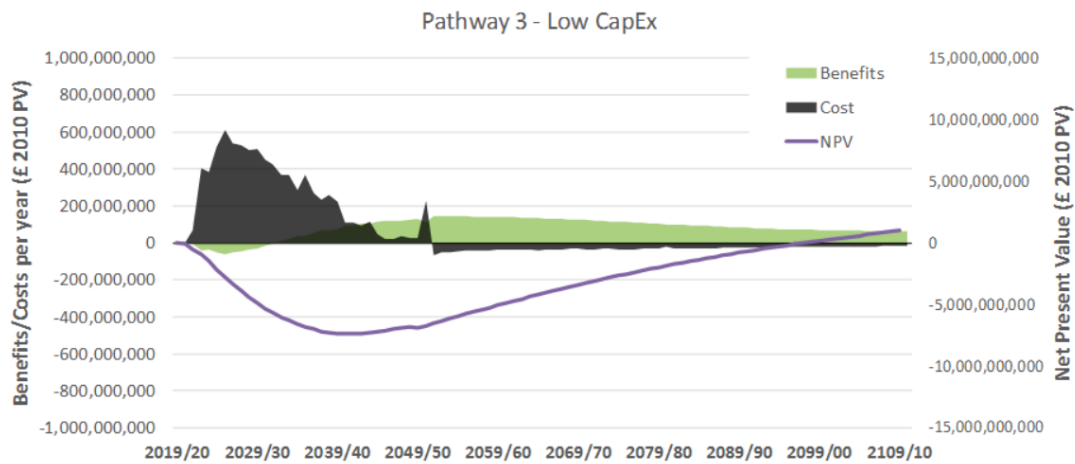


Fig. 2. Costos y beneficios por año con una tendencia acumulativa del VAN [14].

# Planteamiento del problema

El plan para la descarbonización de Costa Rica fomenta el desarrollo de proyectos para implementar un tren eléctrico en el país. Sin embargo, muchas de las acciones que se han propuesto no han sido ejecutadas por diversas razones en varias administraciones del Poder Ejecutivo de la República [1]. Esto implica que el plan establecido en el 2018, mediante el cual el país se comprometió a contar con un tren de pasajeros 100 % eléctrico para 2035, parezca cada vez más difícil de ejecutar para la fecha establecida como límite.

Se conocen los beneficios que puede traer un tren eléctrico, no solo para la institución encargada (INCOFER), sino también para todo el país, principalmente el GAM. No obstante, la dirección que ha tomado el país en torno a la movilidad ha sido primordialmente orientada hacia la mejora de carreteras para vehículos, ampliando el medio de transporte ya existente y sin buscar otras alternativas que podrían solucionar eficazmente el problema [8].

En Costa Rica, alrededor de 15 956 personas utilizan el tren diariamente; sin embargo, el 67 % de las personas que se transportan para ir a trabajar utilizan autobús o vehículo privado para tal fin, principalmente por la rapidez que ofrecen para llegar a sus lugares de empleo [1]. De este modo, en muchas ocasiones se deja de lado el servicio de trenes del GAM, el cual aún sigue representando un sistema de transporte lento e ineficiente para que las personas puedan trasladarse a sus destinos.

Los estudios que se han presentado para el desarrollo de un tren eléctrico suelen enfrentar una falta de voluntad política o de disposición por parte de las instituciones para que estos puedan ser llevados a cabo. Así, se han ignorado repetidamente los beneficios que traería un tren eléctrico a nivel técnico, económico y ambiental. Adicionalmente, hay una escasez de datos relevantes que puedan demostrar estos beneficios para poder incentivar que se implemente un proyecto de tren eléctrico dentro del GAM.

Tabla 1: Desviación entre debiera y realidad.

		<b>Dato suministrado</b>	<b>Referencias bibliográficas</b>
<b>Debiera</b>	Se establece en el plan para la descarbonización de Costa Rica que para el plazo 2023-2030 debe implementarse el proyecto del Tren Eléctrico de Pasajeros de la GAM.	Para el 2035 el Tren de Pasajeros operará 100 % eléctrico	[3]
<b>Desviación (problema)</b>	Actualmente toda la flota de trenes del INCOFER trabajan con combustión interna de diésel. Se han desarrollado seis proyectos de trenes eléctricos livianos de pasajeros para las rutas ya existentes dentro de la GAM de los cuales ninguno se ha concretado. El país ha establecido también varios planes a nivel país en cuanto a la descarbonización, a la eficiencia energética y al transporte eléctrico, en donde en cada uno se ha presentado la importancia del tren eléctrico, sin embargo, se ha dejado muy de lado dándole más prioridad al transporte privado.		
		<b>Dato suministrado</b>	<b>Referencias bibliográficas</b>
<b>Realidad</b>	En Costa Rica aún no existe un tren eléctrico para el 2024 y tampoco existe un plan para implementarse en los próximos años.	Para el presente año 2024, en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica el tren de pasajeros es 0 % eléctrico.	[4]

# Objetivos

## Objetivo general

Desarrollar un estudio de prefactibilidad técnico-financiero a través de un análisis comparativo entre los trenes actuales de combustión interna en Costa Rica y un tren eléctrico ligero, mediante un análisis del costo del ciclo de vida útil para la obtención de datos en correspondencia a la eventual implementación de un tren eléctrico en el país, según el *Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050* y el *Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030*.

## Objetivos específicos

- Realizar un análisis detallado del tren de combustión interna actual mediante sus características técnicas y operativas, para el proceso de comparación con trenes eléctricos de naturaleza semejante disponibles en el mercado.  
**Indicador de logro:** Elaboración de un informe completo que documente el análisis realizado y presente los hallazgos obtenidos en relación con las características técnicas y operativas de ambos tipos de trenes.
- Determinar la infraestructura eléctrica preliminar necesaria por medio de datos teóricos de diversos proyectos desarrollados en otros países para el suministro eléctrico de una eventual implementación del tren eléctrico ligero.  
**Indicador de logro:** Análisis detallado de la infraestructura eléctrica para el suministro eléctrico del eventual tren eléctrico.
- Desarrollar un análisis de los costos del ciclo de vida útil de los trenes de combustión y los trenes eléctricos ligeros mediante la comparación de sus costos de adquisición, operativos, de mantenimiento y descarte para el establecimiento de un impacto financiero acorde a su ejecución.  
**Indicador de logro:** Obtención de una comparativa con todos los costos operativos, de adquisición, de descarte y de mantenimiento, determinando la mejor opción.
- Determinar el impacto ambiental y a la salud de una eventual transición a trenes eléctricos a través de una cuantificación teórica de gases de efecto invernadero y de ahorro energético con miras a una transición efectiva y fundamentada.  
**Indicador de logro:** Cuantificación teórica del impacto ambiental y a la salud de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de la operación de los trenes eléctricos, así como los ahorros energéticos asociados con su uso.

# Justificación

La demanda de derivados del petróleo por medio de la combustión interna en sistemas de transportes se ha venido incrementando, según datos obtenidos del *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030*, en donde se estima que, incluso para el año 2034, se aumentará en casi dos millones de barriles requeridos por el país [15]. Además, en América Latina y el Caribe, se emite una cantidad de GEI por encima de las 2500 MtCO<sub>2</sub> [16], de las cuales el 39 % proviene del sector de transporte, que es el mayor responsable de este total. Esta situación se debe a la dependencia que aún persiste con respecto a los derivados del petróleo en la región [17].

A razón de lo anterior, los países han implementado planes de desarrollo urbano sostenible, principalmente en cuanto al impacto del transporte, los cuales buscan disminuir esa cantidad de gases de efecto invernadero. En la Figura 3, se puede observar la cantidad de planes prioritarios relacionados con el transporte en los países de Latinoamérica y el Caribe, en donde 11 de 19 de ellos buscan mitigar los problemas relacionados con este ámbito [16].

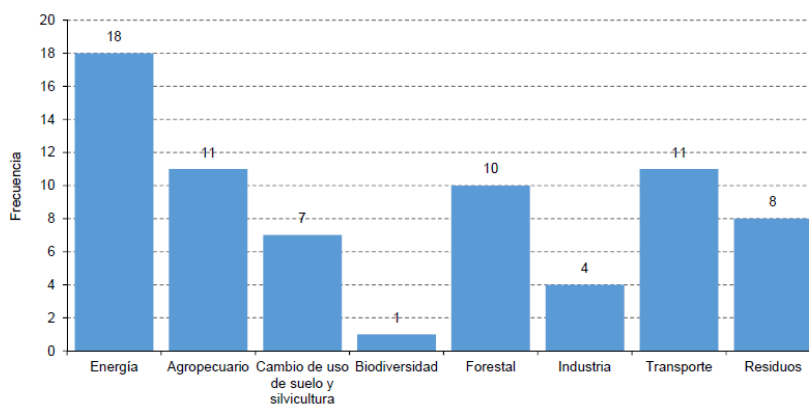


Fig. 3. Frecuencia de casos por sectores prioritarios en mitigación [16].

Muchos de estos planes están relacionados con los acuerdos y objetivos internacionales dirigidos a alcanzar esa descarbonización. En esta línea, un estudio realizado a nivel europeo se centró la implementación de acciones para mitigar el problema del transporte. En el 2019, se determinó que cerca de 5.4 trillones de personas viajaron vía terrestre en los 27 países miembros del EU-27, de las cuales el 79.6 % lo hizo utilizando transporte privado, a través de vehículos particulares [18]. Por otra parte, en el 2020-2021, se disminuyó esa cantidad a casi cuatro trillones de personas que utilizaron el medio de transporte vía terrestre [19].

A pesar de que los datos disminuyeron significativamente en el 2020 debido a la pandemia por la COVID-19, también continuaron bajando a nivel europeo debido a los cambios realizados en el transporte y la promoción del uso del servicio público. Esto se puede evidenciar en la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido

debido al transporte en los mismos países miembros del EU-27, donde en el 2019 la cantidad fue de aproximadamente 1100 MtCO<sub>2</sub> y en el 2023 llegó a cerca de 1050 MtCO<sub>2</sub>. Además, las proyecciones estiman que, para el 2030, la cantidad de CO<sub>2</sub> se habrá disminuido alrededor de un 18 % [20].

Uno de los principales beneficios de un tren, ya sea eléctrico o no, es que ha demostrado tener un impacto positivo tanto en lo económico como en lo social. Esto se ha evidenciado en varios países de Latinoamérica, en donde se han desarrollado varios proyectos ferroviarios que ejemplifican el ahorro social generado por el transporte de pasajeros. Tal es el caso de Brasil, en donde alrededor del 2,1 % y el 4,4 % del PIB fue de ahorro social en la implementación de trenes de pasajeros; por otra parte, en México fue de 1,4 % y en Uruguay, de un 1.9 % [21]. Esto demuestra una importante ventaja económica y social para un país al incorporar un tren en su sistema de transporte.

En Costa Rica, la falta de proyectos y políticas relacionadas con el transporte público masivo, como es el caso de los sistemas ferroviarios, afecta negativamente al desarrollo del país. Además, la cantidad de vehículos en el territorio nacional ha crecido exponencialmente, llegando a sobrepasar los más de un millón de vehículos particulares [1]. Por otra parte, el Estado de la Nación también incluye en su reporte anual que el sistema de transporte será bueno y eficiente si se cubre en menor tiempo el desplazamiento de un punto a otro. Sin embargo, actualmente en el país, se realizan viajes intercantonales que pueden durar hasta 3.5 horas debido a la congestión vial, lo que implica un impacto económico significativo. Este problema representa un 3,8 % del PIB, equivalente a 2 527 millones de dólares al año que el país se podría ahorrar. [1].

A raíz de esto, se demuestra que una posible solución a estos problemas radica en el impulso de otras formas de transporte en el país. Es por ello que el análisis del costo del ciclo de vida en los proyectos de construcción va más allá de las cifras monetarias, ya que también proporciona una comprensión profunda de la complejidad del proyecto, al involucrar la recopilación de datos, la predicción de efectos futuros y la identificación de aspectos ambientales clave. Esto permite a las instituciones y empresas la toma de decisiones más informadas y estratégicas durante todas las etapas del proyecto [22]. Además, el *Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030*, resalta la importancia de los estudios de prefactibilidad para la implementación de un tren eléctrico en el país y subraya la relevancia de desarrollar proyectos de este tipo debido a sus beneficios ambientales y sociales, alineados con las estrategias del Acuerdo de París [5] [3] [23].

# Alcance

Este trabajo busca analizar las principales características de la tecnología de los trenes actuales y compararla con las de un tren eléctrico ligero, estableciendo similitudes relevantes para la comparación. Para ello, se debe estudiar a fondo el sistema de trenes que existe actualmente en el país, los cuales son de combustión y varios cuentan con bastantes años de uso. Sin embargo, ocho de los trenes tienen cuatro años de estar operando en el país y, a pesar de que aún están en buen estado, se utilizarán en este proyecto de prefactibilidad, ya que no solo se medirá la antigüedad como un indicador para la comparación, sino que también se pretende elaborar un estudio de impacto ambiental que cuantifique las emisiones de gases de efecto invernadero liberadas por este tipo de tren.

Por medio del análisis del costo del ciclo de vida útil, se buscará abarcar principalmente la parte técnica correspondiente a los costos operativos. Adicionalmente, se tomarán en cuenta otros rubros como los costos de mantenimiento, adquisición y descarte; además, con esta comparación, se determinará la cantidad de trenes eléctricos necesaria para sustituir los trenes actuales.

Por otra parte, para la comparativa, se estimará un periodo de años de operación de ambos tipos de trenes, para poder dar estimados más certeros con respecto a esta conversión.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tendrá un alcance y una investigación correlacional y descriptiva.

# Viabilidad

A pesar de que la organización carece de control directo sobre los trenes en funcionamiento en el país y no posee acceso directo a los datos operativos de estos, cuenta con relaciones establecidas con diversas instituciones que sí tienen acceso a dicha información. A través de estas relaciones, será posible obtener los datos necesarios para llevar a cabo el análisis comparativo de los trenes con mayor precisión y fiabilidad.

Además, para optimizar el estudio, se dispone de herramientas especializadas, como el *software* SimaPro, diseñado específicamente para el análisis de costos del ciclo de vida. Esta herramienta proporciona funcionalidades avanzadas que facilitan el estudio comparativo de los trenes, permitiendo una evaluación exhaustiva de los costos operativos y el impacto ambiental asociado a cada opción. El uso de SimaPro garantiza la rigurosidad y la objetividad en el análisis, lo que contribuye a obtener resultados sólidos y fundamentados para la toma de decisiones.

# Administración del riesgo

Como la empresa que brinda el apoyo para el presente proyecto no está estrechamente relacionada con la operación de los trenes, puede existir una dificultad para obtener los datos necesarios para el análisis. Sin embargo, si algunos de estos datos no se logran obtener, se tiene el alcance de la ficha técnica y de fabricación de dichos trenes, a partir de lo cual se puede acercarse teóricamente a los resultados esperados, aunque con mayor dificultad en el estudio.

Al existir una relación de parte del CPSU con diferentes instituciones públicas, aparte del INCOFER, que puedan administrar los datos necesarios de los trenes por estudiar, se tiene previsto acudir a estas relaciones para poder encontrar mejor los datos.

El SimaPro puede brindar una gran cantidad de datos necesarios para el análisis, sin embargo, es posible que se requiera igualmente un análisis más profundo y teórico de este estudio.

# Marco teórico

## Generalidades de los trenes

La historia de los trenes se remonta a la invención de los sistemas de vapor en 1769, pero no fue hasta 1814 que se construyó la primera locomotora de vapor [24]. El transporte por medio de vías férreas permite el movimiento de grandes masas, ya sea de productos o de personas, y tiene grandes ventajas en comparación con otros medios de transporte terrestres, como los tiempos de traslado, que son más rápidos y efectivos debido a que viajan por una misma línea con horarios definidos. Por otra parte, son menos contaminantes, ya que, al tener la capacidad de transportar a una mayor cantidad de personas, emiten menor cantidad de CO<sub>2</sub> por individuo movilizado [25].

La ingeniería de trenes se basa en el diseño, construcción, mantenimiento y operación de los sistemas de transporte ferroviarios. Dicha rama abarca muchas áreas como la construcción de puentes y líneas, la manufactura de las locomotoras, el manejo de los sistemas de comunicación y control, la electrificación, el diseño y el mantenimiento de los sistemas.

## Material rodante

Este término se refiere a todo tipo de vehículo que cuente con características físicas en sus ruedas que les permita desplazarse sobre una vía férrea, con el objetivo de movilizar distintos tipos de cargas de un lugar a otro [26].

## La vía férrea

La vía férrea está dividida en dos componentes principales. En primer lugar, se encuentra la infraestructura civil, que abarca toda la construcción, ya sean puentes, túneles, terraplenes, etc., donde se encuentra la vía. En segundo lugar, está la superestructura, que incluye los carriles, la vía en placa o en balasto y las capas inferiores que van debajo de este [27].

## El *bogie*

Es el chasis donde están montados los ejes y las ruedas del tren. Además, soporta el peso del vagón y permite un desplazamiento suave con el movimiento del tren gracias a las suspensiones integradas [27].

## Locomotoras de diésel

Las primeras locomotoras de combustión interna funcionaron por medio de gasolina, sin embargo, en la actualidad se prefiere el uso del diésel, que consume una tercera parte menos que un motor con inyección

de gasolina, además de ser más económico. Estas locomotoras suelen ser más pesadas, pero son bastante utilizadas en el transporte de materiales. Por otro lado, los automotores de diésel tienen una desventaja actualmente y es su corta aplicación en trenes de alta velocidad, debido a que estos alcanzan velocidades de entre 160 y 205 km/h [27].

Para los motores de las locomotoras de diésel, existen diferentes tipos de transmisiones para que la curva de variación del par motor se adapte a la hipérbola equilátera ideal. Esto último quiere decir que el producto del par y la velocidad llegue a ser constante. En este sentido, existe la transmisión mecánica, hidráulica, eléctrica o combinaciones de estas [27].

## Locomotoras eléctricas

Debido al crecimiento de la industria de la electrificación en los medios de transporte, la evolución de las locomotoras de combustión interna comienza a quedar en el pasado. Las locomotoras eléctricas se dividen en tres tipos, las de corriente directa (DC), que pueden ser clásicas o las conocidas como *chopper*; las de corriente alterna (AC) monofásicas; y las de corriente alterna o directa trifásicas. De estas, la técnica *chopper* se ha dejado de utilizar debido a su complejidad, los sistemas de corriente directa se utilizan bastante con todo el mantenimiento respectivo que requieren, y la corriente alterna es la que más se ha utilizado a nivel mundial [27].

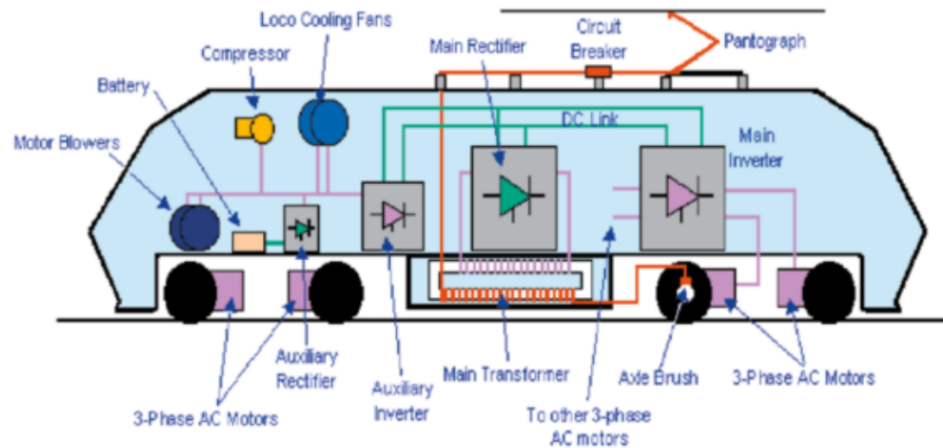


Fig. 4. Diagrama de bloques de una locomotora eléctrica AC [27].

Las locomotoras eléctricas tienen bastantes ventajas con respecto a otros tipos de sistemas ferroviarios. Una de ellas es que el motor requiere menos mantenimiento, y tiende a ser menos pesado y voluminoso, pero con bastante potencia de carga. Otra ventaja es que tienen mayor capacidad de recuperar energía, sobre todo a altas velocidades. Por otra parte, una de sus desventajas es que el equipo eléctrico es más complejo y costoso, además de que requiere de equipos eléctricos extra fuera de la locomotora [27].

Las líneas eléctricas de las que se alimenta la locomotora suelen suministrar 220/230 V o 380/400 V a frecuencias de 50 Hz en el caso de Europa [27].

## Transmisión eléctrica de un tren diésel

Algunos trenes de combustión tienen un sistema de transmisión eléctrica, el cual está compuesto por un generador que va acoplado al motor diésel, encargado de darle alimentación eléctrica a uno o varios motores eléctricos en los ejes de la locomotora [27].

## Pendiente de las vías férreas

Este es un factor importante que se debe evaluar para definir las rutas de las líneas de un tren, ya que afecta la adherencia de las ruedas con la vía. Para este tipo de medios de transporte, es necesario minimizar pendientes muy pronunciadas. Para trenes de alta velocidad, se recomienda que esta pendiente no sea mayor de un 3 %, y, para tranvías y metros, hasta un 4,5 %. La pendiente se puede determinar de diferentes formas, ya sea en mm/m o en porcentaje [27]. En los sistemas ferroviarios, es común calcularla en mm/m a partir de la diferencia de alturas entre la diferencia de la distancia horizontal [28]. También se puede representar en porcentaje, de manera que, por cada 100 metros, se eleva cierta cantidad; por ejemplo, una pendiente del 2 % implica una elevación de 2 metros en 100 metros horizontales [27].

## Disposición ejes del tren

La disposición de los ejes del tren se refiere a cómo están distribuidas las cargas del sistema de propulsión del vehículo ferroviario [27]. A continuación, se muestran dos tipos comunes de disposiciones.

**Bogie tipo Bo-Bo:** Esta es la disposición de un tren que posee dos *bogies* de dos ejes, y cada eje tiene su propio motor de tracción [29].

**Bogie tipo Co-Co:** Estos, poseen tres *bogies* con dos ejes cada uno e igualmente, cada eje tiene su propio motor de tracción [29].

## Configuración de los trenes

A esto se refiere con la composición de los vagones, con sus locomotoras o la unión de estos en un mismo vehículo [26]. En la siguiente figura, se muestra una tabla con diferentes configuraciones comunes con sus características.

Configuración	Denominación
Coche motor-Coche intermedio-Coche motor	M-Ri-M
Coche motor-Remolque intermedio-Remolque con cabina	M-Ri-Rc
Coche motor-Coche motor	M-M
Coche motor	M

Fig. 5. Configuraciones comunes de los trenes. [26].

## **Vehículo férreo ligero-Light Rail Vehicle (LRV)**

Estos son tipos de trenes ligeros que usualmente recorren distancias cortas y son aptos para utilizarse en zonas metropolitanas. Tienen capacidad para transportar menos pasajeros debido a que poseen pocos vagones. Un LRV se asimila a un tranvía o a un metro [27].

Otra característica que los diferencia de un tren de largas distancias es que los tiempos entre sus estaciones son cortos y suelen tener muchas paradas en su recorrido; además, disponen de más puertas que los trenes de largas distancias, para facilitar el ingreso más rápido de los pasajeros. Adicional a esto, los LRV, al igual que los tranvías y metros, pueden transportar a más personas por  $m^2$  [27].

Normalmente, estos tipos de vehículos férreos tienen piso bajo para facilitar la entrada de pasajeros, lo que permite estaciones menos complejas para su construcción. Asimismo, estos trenes tienen un menor peso que los de otro tipo, y, por ende, tienen menos peso por eje y potencias más bajas en sus motores, lo que conlleva un importante ahorro de energía. Los tranvías o metros tienen capacidades de soportar pendientes de hasta 4,5%, comparado a un 3% de capacidad que tienen los ferrocarriles de altas velocidades [27].

## **Acumulador de carga rápida (ACR)**

La fabricante CAF desarrolló un sistema de carga para tranvías o trenes ligeros que permite un almacenamiento dentro de los vehículos mediante ultracondensadores, eliminando la necesidad de utilizar un sistema de catenaria y reduciendo el impacto visual. Estos sistemas se cargan con catenaria únicamente mientras los vehículos están detenidos en las estaciones [30].

## **Sistema de alimentación por suelo (APS)**

Este sistema fue desarrollado para la alimentación alterna de tranvías y metros, con el propósito de prescindir del uso de catenaria en zonas donde se evite el uso de cables aéreos [31].

Estos sistemas poseen un tercer carril en el centro, por donde se alimenta el tren. Estos carriles se acomodan por medio de segmentos separados por aislantes, y son manipulados para que solo se energicen cuando el tranvía o metro pasa sobre ellos [31].

## **Alimentación en "T" y en " $\pi$ "**

En las líneas de catenaria, las subestaciones se pueden acomodar de varias maneras dependiendo de la carga y de lo requerido por la institución encargada. Existen dos tipos, conocidos como alimentación en "T" y en " $\pi$ ". La primera configuración organiza la línea mediante aislantes aéreos entre subestación y subestación, donde hay un seccionador motorizado o manual el cual se encuentra normalmente abierto [27].

Por otro lado, en la configuración de la alimentación " $\pi$ ", el seccionador está normalmente cerrado, haciendo que los dos positivos de ambas subestaciones se encuentren en paralelo, aportando energía de manera analógica según la distancia a la que se encuentre el tren. Esta configuración implica un mejor reparto de cargas y menores caídas de tensión en la línea de catenaria [27].

## **Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030**

En el 2018, el gobierno de la época impulsó una serie de medidas encaminadas a la transición hacia energías limpias en la matriz energética nacional; entre ellas se encuentra el *Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030*, el cual va acorde con la Ley No. 9518, que trata de incentivos y promoción para el transporte eléctrico. En dicho plan, se establecen enfoques y principios orientados a la eficiencia energética, el uso de energías renovables, el desarrollo de una economía baja en emisiones y la promoción de la sostenibilidad energética [23].

El PNTE se orienta gracias a diversas políticas y planes como la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), también va relacionado con lo establecido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Por otra parte, la Ley No.8219 incluyó a Costa Rica en el Protocolo de Kyoto, el cual busca reducir cinco gases de efecto invernadero en un 5.2% a nivel mundial. Otros de los acuerdos que sustentan este plan son el Acuerdo de París, los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Estrategia Energética Sustentable Centroamericana 2020. Además, se basa en varios planes y estrategias desarrollados a nivel nacional [23].

Este plan explora la situación actual del transporte en Costa Rica, destacando la importancia de contar con una infraestructura ferroviaria eléctrica como parte de la estrategia para implementar un tren eléctrico de pasajeros en el GAM para el 2030 [23].

## **Plan para la Descarbonización 2018-2050**

Este plan se creó en el 2018 para buscar una descarbonización en la economía de Costa Rica. En primer lugar, analiza las emisiones contaminantes generadas por los distintos sectores, señalando que, según las fuentes de energía utilizadas, el transporte es el mayor emisor debido a la limitada inversión en sistemas de transporte masivo de pasajeros y a la prioridad otorgada a los medios de movilización privados [3].

Del mismo modo, en ese plan, se establecen los pasos necesarios para buscar reducir las emisiones de GEI en el país, mediante acciones, rutas por sector y una inversión continua. En ese contexto, el primer eje que se establece es el desarrollo de un sistema de movilidad basado en transporte público seguro, eficiente y renovable, y en esquemas de movilidad activa. Como parte de dicha estrategia, se menciona la implementación de un tren eléctrico que conecte Cartago, San José, Heredia y Alajuela [3].

## **VII Plan Nacional de Energía 2015-2030**

Dentro de las estrategias que se establecen en el *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030*, se encuentra generar cambios en el Sistema Eléctrico Nacional, de manera que se mejore la eficiencia energética, se aumente el ahorro, se logre un mejor manejo de la demanda eléctrica, se estimule el desarrollo de la generación distribuida y el autoconsumo de electricidad, se promueva la eficiencia energética en el marco jurídico e institucional, se mejoren los métodos de cálculo de tarifas eléctricas y se eleve la gestión de las entidades públicas del sector de la electricidad [15].

El PNE se orienta principalmente a la sostenibilidad energética con bajas emisiones. Dentro del estudio del plan, se da un diagnóstico al sector de transporte y combustibles, evidenciando la importancia del enfoque hacia el transporte público para garantizar una mejora en la reducción de emisiones y mayor eficiencia energética. Uno de sus ejes se enfoca en el transporte, dentro del cual se establece la necesidad de optimizar el servicio público para reducir el uso de medios de movilización privados, además de mejorar las tecnologías del transporte público [15].

## Transporte público

El Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos define el transporte público como el movimiento de personas en un medio compartido, incluyendo carros, buses, tranvías, trenes, ferris, metros, trolebús, etc., todos relacionados entre sí para el bien social y para beneficio del traslado de personas de un lugar a otro [32].

El transporte público facilita que las personas se desplacen hacia sus lugares de trabajo, accedan a recursos básicos, reciban atención médica o disfruten de actividades recreativas. Un aspecto por considerar del transporte público es la oportunidad que brinda a quienes no tienen algún medio para transportarse [33].

La importancia del transporte radica en las ventajas que ofrece según su uso y adecuación dentro de una sociedad. Su impacto, positivo o negativo, depende del ordenamiento y planificación con que se implemente. Esta relevancia puede analizarse desde perspectivas económicas y sociales. En cuanto a lo económico, el transporte público afecta en los diferentes procesos que los ciudadanos, empresas instituciones o incluso el país entero requieren desarrollar. Lo social se ve afectado en cuanto a las relaciones entre personas o grupos que se ven facilitadas gracias al transporte masivo [34].

## Global Warming Potential (GWP)

El GWP compara diferentes tipos de GEI con respecto al  $\text{CO}_2$  como base, con el fin de proporcionar un mejor entendimiento del impacto que estos agentes contaminantes tienen en la atmósfera y en el cambio climático [35].

Para evaluarlo, se utiliza un rango de años, normalmente de 100 años, y se multiplican los valores correspondientes a la cantidad de kilogramos emitidos de diversos gases como el  $\text{N}_2\text{O}$  o el  $\text{CH}_4$  por un multiplicador establecido de GWP, para así obtener el estimado de GWP. Su resultado, finalmente, será un valor total de GEI en términos de emisiones de  $\text{CO}_2$  [35].

La importancia general de esta medida es que se puede considerar a la hora de establecer políticas alrededor del mundo y permite una toma de decisiones informada [35].

## Valor actual neto (VAN)

Se define como el valor actual de la diferencia entre ingresos y egresos periódicos de una propuesta o proyecto. Dentro del cálculo del VAN, se utiliza la medida de la rentabilidad mínima para poder recuperar inversión, cubrir costos y obtener beneficios [36]. El VAN es un indicador de un análisis beneficio-costos; es decir, que se busca que los beneficios de una inversión compensen los costos totales en el desarrollo de un proyecto [37].

## Tasa interna de retorno (TIR)

Este término es utilizado también para tomar beneficio de la inversión de un proyecto establecido. El TIR es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos y egresos de un proyecto, equilibrando los flujos de ingresos; es decir, mide el rendimiento del dinero que se mantiene en el proyecto [36].

## **Costo total de propiedad (TCO)**

El cálculo del TCO es el costo que engloba un producto o bien durante toda su vida útil operativa en una organización. Para ello, se toman en cuenta diferentes variables de costos con respecto al activo, las cuales se deben tener definidas antes de su adquisición [38].

# Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto

Se muestra el diagrama de Gantt propuesto correspondiente a las actividades de la Tabla 3.

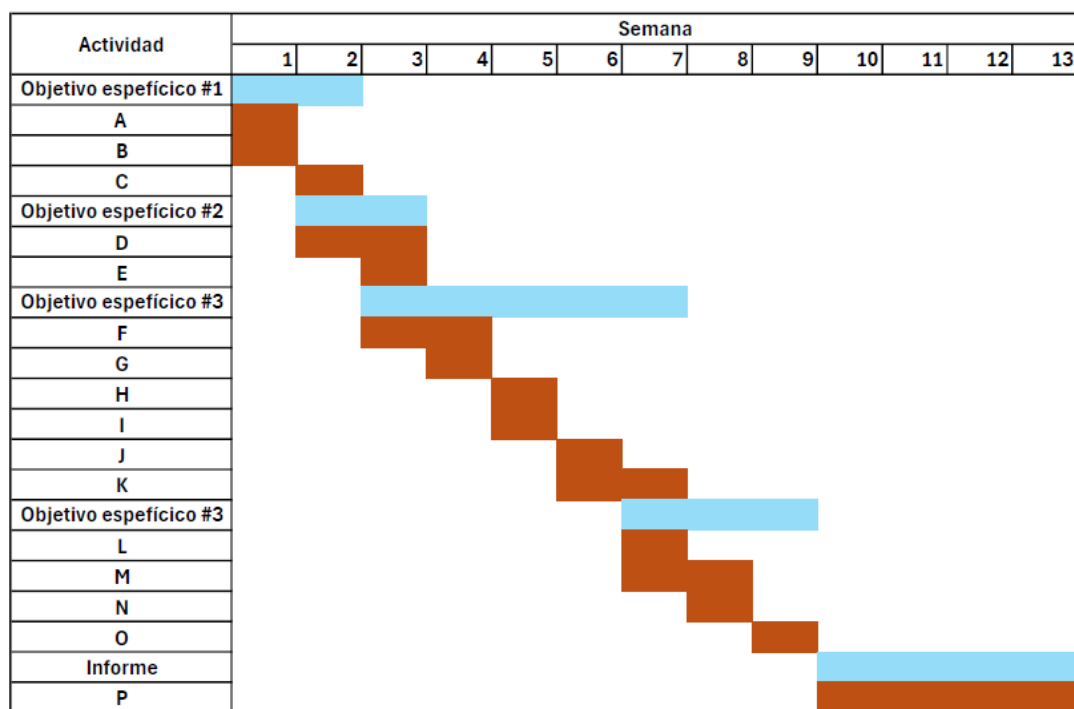


Fig. 6. Diagrama de Gantt del cronograma.

Tabla 2: Actividades por realizar durante el proyecto.

Número actividad	Descripción de la actividad	Semana de inicio	Duración (días)	Semana de finalización
A	Estudio de fichas técnicas, catálogos y documentos relevantes para obtener información sobre los trenes actuales.	1	2	1
B	Recopilación de información en un informe sobre la eficiencia energética de los trenes y su consumo energético.	1	3	1
C	Determinación mediante la recopilación de datos, de la selección de un tren eléctrico de naturaleza comparable.	2	3	2
D	Investigación sobre diferentes tipos de instalaciones de los trenes eléctricos ligeros.	2	4	3
E	Evaluación de la infraestructura eléctrica correspondiente al eventual tren eléctrico.	3	3	3
F	Recopilación de datos de los costos operativos, de mantenimiento y de descarte del tren actual de combustión interna.	3	4	4
G	Recopilación de datos de los costos operativos, de mantenimiento, de descarte y de adquisición del tren eléctrico ligero.	4	4	4
H	Generación de curvas de mantenimiento de ambos tipos de trenes.	5	2	5
I	Determinación del VAN y TCO para ambos tipos de trenes.	5	3	5
J	Realización del análisis del costo de ciclo de vida útil de ambos trenes.	6	4	6
K	Evaluación de los resultados obtenidos.	6	2	7
L	Determinación de los beneficios correspondientes a los resultados en términos del impacto ambiental.	7	3	7
M	Determinación de los beneficios correspondientes a los resultados en términos del impacto a la salud.	7	3	8
N	Análisis de las emisiones de CO <sub>2</sub> y los costos indirectos a la salud y al ambiente.	8	3	8
O	Cuantificar el ahorro de consumo energético de los trenes.	9	3	9
P	Redacción del informe final.	9	22	12

# Metodología por seguir

A continuación se detalla la metodología a seguir para el desarrollo del presente proyecto en la Tabla 2.

Tabla 3: Metodología por emplear en el desarrollo del proyecto.

<b>Objetivo específico planteado</b>	<b>Actividad por realizar</b>	<b>Fuente de información</b>	<b>Análisis de datos con criterios estadísticos</b>	<b>Resultados esperados (indicador de logro)</b>
Objetivo específico #1:	Análisis de los trenes actuales de combustión correspondiente a sus características técnicas de operación para evaluar un posible tren eléctrico con similitudes a este.	Datos obtenidos por medio de la organización, fichas técnicas, catálogos.	Evaluación de capacidad de potencia, torque, capacidad de carga de pasajeros, velocidad del tren.	Realización del análisis comparativo para escogencia de un tren con características similares.
Objetivo específico #2:	Determinación de la infraestructura eléctrica para el suministro energético.	Datos obtenidos por medio de la organización, fichas técnicas, catálogos, <i>papers</i> , proyectos.	Evaluación de consumo eléctrico, potencia, peso demandado por las locomotoras.	Determinación de un informe sobre la infraestructura eléctrica requerida.
Objetivo específico #3:	Análisis del costo del ciclo de vida de los trenes de combustión y el tren eléctrico establecido mediante sus costos de operación, de adquisición, de descarte, y de mantenimiento.	SimaPro, datos obtenidos por medio de la organización, fichas técnicas, catálogos.	Consumos energéticos y de combustible, costos de mantenimiento, costos de combustible, costo kWh, TCO, VAN.	Desarrollo del costo del ciclo de vida de ambos trenes determinando indicadores de confiabilidad, el VAN y el TCO, para su respectiva comparación.
Objetivo específico #4:	Determinación de los beneficios correspondientes a la escogencia de un sistema de locomotoras eléctricas, con respecto al impacto ambiental y a la salud.	SimaPro, datos obtenidos por medio de la organización, <i>papers</i> .	Emisiones de CO <sub>2</sub> de ambos tipos de trenes, costos directos e indirectos del impacto a la salud y al ambiente, ahorro de consumo energético.	Determinación cuantitativa de las emisiones de GEI y de ahorro energético para fundamentar la eventual transición.

# Análisis de resultados

## Objetivo 1.

Realizar un análisis detallado del tren de combustión interna actual mediante sus características técnicas y operativas, para el proceso de comparación con trenes eléctricos de naturaleza semejante disponibles en el mercado.

### Características operativas generales.

Para el desarrollo de un análisis de los trenes de combustión interna en el país, fue necesario conocer las diferentes distancias, rutas, relieves, número de recorridos y cantidad de pasajeros que viajan en las líneas férreas.

El tren interurbano de pasajeros del GAM en Costa Rica recorre cuatro provincias: San José, Heredia, Cartago y Alajuela. La ruta más utilizada es la de San José-Cartago, en la cual viajaron 1.352.621 personas solo en 2023. A continuación, se detallan de una mejor manera los recorridos y distancias.

Tabla 4: Recorridos y distancias de la línea férrea del tren de pasajeros en el GAM [39].

Descripción de recorridos	Distrito inicio	Distrito final	Distancia (km)
Metrópolis III-Estación Pacífico-Est. Atlántico-CFIA	Pavas	Curridabat	17,25
Río Segundo-U Latina	Río Segundo	San Pedro	20,17
Estación Pacífico-Pavas-Metrópolis III	Hospital	Pavas	9,68
Estación Pacífico-Pavas-Estación San Antonio de Belén	Pavas	San Antonio	14,39
Estación Atlántico-Heredia-Alajuela	El Carmen	Alajuela	20,85
Estación Atlántico-Estación Cartago	El Carmen	Oriental	21,85
Estación Pacífico-Estación Atlántico	Hospital	Carmen	3,58
<b>Distancia total (km)</b>			<b>107,78</b>

Para comprender mejor los recorridos expuestos anteriormente, se muestra la siguiente figura extraída de la página oficial del INCOFER. En esta se especifican las rutas con los nombres de cada estación.



Fig. 7. Rutas actuales del tren de pasajeros en el GAM [40].

Por otra parte, se recopiló la cantidad de pasajeros que viajaron a partir de 2021 y hasta julio de 2024 en las distintas rutas actuales del tren de pasajeros en el GAM. Los datos fueron recopilados de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). No se encontró información con respecto a la cantidad de pasajeros anterior a 2021.

Tabla 5: Cantidad de pasajeros al año [41]

Año	Cantidad de pasajeros
2021	957827
2022	2568208
2023	3377504
2024	2317694

A partir de los datos anteriores, se elaboró el siguiente gráfico sobre el comportamiento de la cantidad de pasajeros desde 2021 y hasta julio de 2024. En esta figura, se observa un decrecimiento, aunque los datos completos de la cantidad de pasajeros en 2024 podrían llegar a ser mayores.

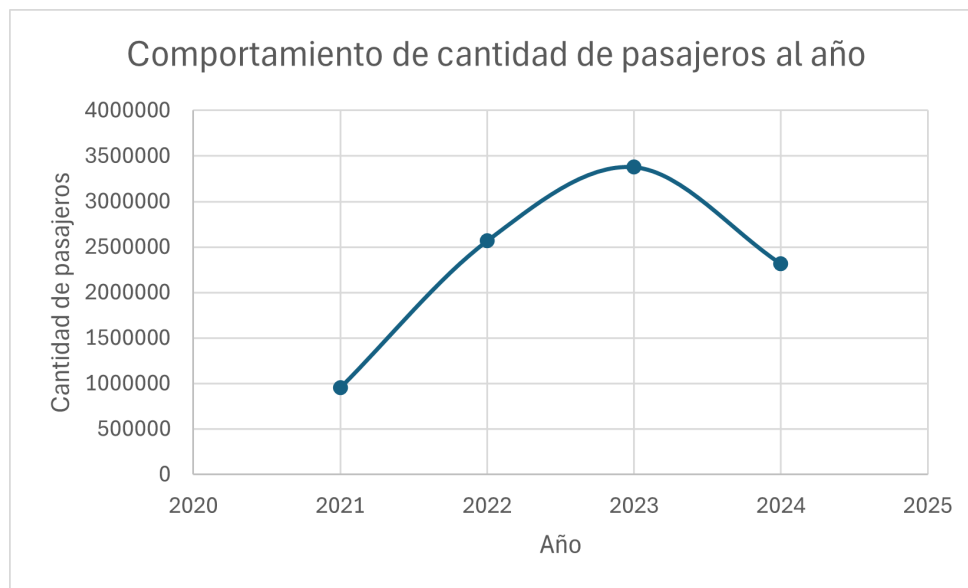


Fig. 8. Gráfico del comportamiento de cantidad de pasajeros por año. Elaboración propia.

Actualmente, el INCOFER tiene dieciséis trenes en funcionamiento. De estos, ocho corresponden a trenes Apolo Serie 2400 que fueron traídos de España, 4 en 2009 y otros 4 en 2011; y los restantes ocho fueron comprados a China en 2020 a la empresa CRRC, los cuales fueron apodados DMU para Costa Rica, sin embargo, se les denomina de manera numérica como la serie 3100 dentro de la operación del INCOFER. No se obtuvo información con respecto a las rutas que recorre cada uno de los trenes, sino que el único dato que se conoce es que, para la ruta Estación Atlántico-Cartago, solo se utilizan los trenes DMU para Costa Rica debido a que cuentan con mayor potencia y capacidad de ascender hasta el punto más alto de la ruta, que es en el Ochomogo. Para ello, se determinaron las distancias aproximadas que recorre cada uno de los trenes, en donde se dividió la suma total de la distancia que fue expuesta en la Tabla 4 y, en el caso de los DMU para Costa Rica, se le agregó la distancia correspondiente a la ruta de Estación Atlántico-Estación Cartago. Estos datos aproximados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Distancias aproximadas que recorren los dos tipos de trenes de pasajeros en el GAM. Elaboración propia.

Tipo de tren	Distancia aproximada (km)
Apolo	42,96
DMU	64,82

### Características técnicas.

Para evaluar las características técnicas de los dos tipos de trenes que actualmente operan para el traslado de pasajeros, se consultó información de Internet para los trenes Apolo 2400, y del manual del fabricante de la empresa CRRC para los trenes DMU para Costa Rica. Se debe recalcar que las características físicas obtenidas pueden ser un poco genéricas por falta de información acerca de los trenes utilizados específicamente en Costa Rica.

## Feve-Serie UTDE-2400

Para tener una claridad más profunda de los trenes Apolo Serie 2400, se obtuvo información en torno a su fabricación y el tiempo de servicio en España. Dichos trenes fueron adquiridos por la compañía Feve a principios de la década de los años los ochenta [42]. La fabricación de los trenes Feve 2400 fue llevada a cabo por la empresa MTM-Macosa entre 1983 y 1986 y se les denominó Serie 2400 [43]. Se debe aclarar que no se obtuvo especificación de la fecha exacta de fabricación de los trenes de esa serie que fueron traídos a Costa Rica, por lo que se tomó como referencia 40 años de antigüedad de dichos trenes. A continuación, en la Tabla 7 se muestran las características técnicas de los trenes mencionados.

Tabla 7: Características técnicas de los trenes tipo Apolo Serie 2400 [43] [42] [44].

Característica	Valor
Marca/Modelo	Feve-Serie UTDE-2400
Tipo	DMU
Fabricante	MTM-Macosa
Año fabricación	1983-1986
Composición	M-Rc
Cantidad módulos de potencia	2 por unidad
Tipo de motor	VOLVO A.H10A-360
Número de cilindros del motor	6 en línea
Tipo de transmisión	Eléctrica
Diámetro de ruedas	850 mm
Ancho de vía	1067 mm
Anchura de caja	2565 mm
Altura del techo sobre el carril	3797 mm
Longitud entre topes	34,3 m
Potencia nominal por motor	360 CV (265 kW) a 2200 rpm
Velocidad máxima	80 km/h
Peso en orden de marcha (unidad)	66 t
Peso por eje	8,25 t
Tipo de freno	Neumático-aire comprimido
Tipo de enganche	Scharfenberg
Pasajeros por unidad	226

A partir de la tabla anterior, es posible considerar aspectos básicos necesarios para la comparación con un tren eléctrico, como el diámetro de las ruedas, el ancho de la vía, la anchura de la caja, la altura del techo sobre el carril, la longitud entre topes o longitud del tren con sus unidades, la potencia nominal, la velocidad máxima y su peso. Además, como uno de los aspectos importantes por considerar, se encuentra la cantidad de pasajeros que pueden transportar estas unidades, las cuales permiten 90 personas sentadas y 136 de pie dentro de las 2 unidades por cada tren [45], lo que suma un total de 226 pasajeros.

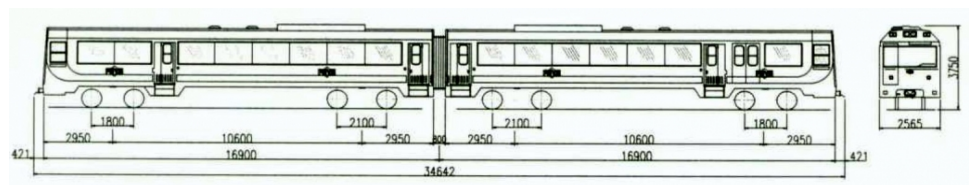


Fig. 9. Diagrama Feve Serie 2400 [43].

## DMU para Costa Rica

Como se mencionó anteriormente, a estas unidades se les denominó DMU para Costa Rica, y fueron compradas a la empresa CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd. en 2020 a partir de las especificaciones requeridas por el INCOFER, como el ancho de vía de 1067 mm. Estos trenes fueron comprados junto con una garantía de tres años que cubrió sus costos de mantenimiento, la cual venció en julio de 2024. En la Tabla 8, se muestran las características técnicas recopiladas a partir del material de capacitación de los DMU para Costa Rica [46].

Tabla 8: Características técnicas de los trenes DMU para Costa Rica [46].

Característica	Valor
Marca/Modelo	DMU para Costa Rica-CRRC
Tipo	DMU
Fabricante	CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd.
Año fabricación	2020
Composición	MC-MC
Cantidad módulos de potencia	2 por unidad
Tipo de motor	Modelo R2876T3-390
Número de cilindros del motor	6 horizontalmente dispuestos
Tipo de transmisión	hidráulica/mecánica
Diámetro de Ruedas	840 mm
Ancho de vía	1067 mm
Anchura de caja	2720 mm
Altura del techo sobre el carril	4074 mm
Longitud entre topes	39,620 m
Potencia nominal por motor	390 kW a 1800 rpm
Velocidad máxima	77 km/h
Peso en orden de marcha (unidad)	73 t
Peso por eje	14 t
Tipo de freno	Neumático y módulo de potencia
Tipo de enganche	Automático delantero/semipermanente entre coches
Torque motor máximo	2300 Nm a 1100-1400 rpm
Pasajeros por unidad	376
Capacidad tanque combustible	1800 L
Potencia máxima de entrada caja de cambios	320 kW
Torque máximo permisible caja de cambios	1900 Nm

Los DMU para Costa Rica, con los dos coches, tienen la capacidad de transportar a 376 pasajeros como 4 personas/ $m^2$  [46]. De igual manera, para este tipo de trenes, se tomaron en cuenta los valores del diámetro de las ruedas, ancho de la vía, anchura de la caja, altura del techo sobre el carril, longitud entre los topes, potencia nominal del motor, torque máximo del motor, velocidad máxima, el peso del conjunto de unidades del tren y la capacidad del tanque de combustible. En la Figura 10, se puede observar un diagrama con algunas medidas del tren DMU para Costa Rica.

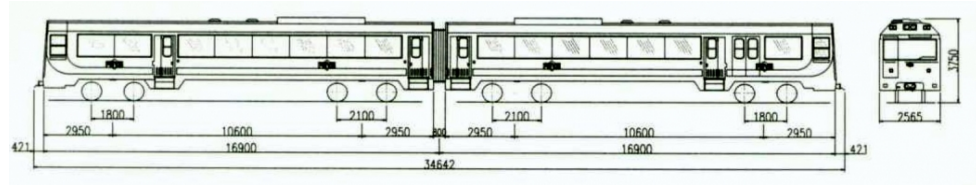


Fig. 10. Diagrama DMU para Costa Rica [46].

Con base en los datos recopilados anteriormente, se realizó la siguiente tabla, que muestra un resumen de las especificaciones técnicas de los dos trenes de combustión interna evaluados. El objetivo es facilitar la búsqueda y evaluación de las características técnicas de un tren eléctrico comparable con la red ferroviaria del GAM en Costa Rica.

Tabla 9: Resumen de las características técnicas promedio de ambos trenes de combustión interna.

Característica	Valor aproximado
Tipo	DMU
Diámetro de ruedas	845 mm
Ancho de vía	1067 mm
Anchura de caja máximo	2720 mm
Altura de techo sobre el carril máx.	4074 mm
Longitud entre topes máximo	39,620 m
Potencia nominal	360-390 kW
Velocidad máxima	70-80 km/h
Peso en orden de marcha máx.	73 t
Peso por eje máximo	14 t
Pasajeros por unidad	376

## Comparación de tren eléctrico ligero.

Como se mostró en la sección del marco teórico del presente trabajo, existen diversos tipos de trenes en el mercado. Sin embargo, para definir el tipo de tren a elegir, se llevó a cabo una reunión con personal del INCOFER, en la que se informó que, en caso de incorporar un tren eléctrico ligero a las rutas ferroviarias del GAM, solo se considerará uno con conexión a catenaria. A partir de esta información, se procedió a recopilar datos sobre este tipo de trenes para realizar una investigación de valor para la institución. Asimismo, en el encuentro se discutió que la pendiente máxima en la vía férrea de Costa Rica es de alrededor de un 4%, por lo que se procedió a buscar trenes eléctricos ligeros de material móvil tipo metro o tranvía que tengan capacidades de pendiente de hasta un 4.5% aproximadamente [27].

### Avenio-Siemens

En primer lugar, se recopilaron características generales de los Avenio, las cuales se sistematizan en la Tabla 10. Posteriormente, se evaluaron datos correspondientes a diferentes tranvías del modelo Avenio en Nuremberg, Copenhague, Múnich y Bremen, los cuales tienen similitudes con las características anteriormente propuestas.

Tabla 10: Características generales del tranvía articulado Avenio-Siemens [47].

Característica	Valor
Fabricante	Siemens
Longitud de vehículo	18-72 m
Módulos permisibles	2-8 módulos por unidad
Anchura de caja	2,3-2,4-2,55-2,65 metros
Ancho de vía	1435 mm
Carga máxima por eje	10,5 t
Velocidad máxima	80 km/h
Material del vehículo	Acero

Ahora bien, en la Tabla 11 se observan las diferentes características de los tranvías del modelo Avenio de Siemens en diferentes países con especificaciones técnicas similares a las de los trenes de Costa Rica.

Tabla 11: Características específicas de diferentes tranvías Avenio en varios países. [48] [49] [50] [51].

Tipo, ciudad y país	Avenio GTA8 Nuremberg, Alemania	Avenio Copenhagen, Dinamarca	Avenio Múnich, Alemania	Avenio Bremen, Alemania
Disposición de ruedas	2' Bo' Bo' Bo'	Bo' 2' Bo' Bo'	2' Bo' Bo' Bo'	Bo' Bo' 2' Bo'
Longitud entre topes	36,850 mm	36,900 mm	36,850 mm	36,900 mm
Anchura de caja	2,300 mm	2,650 mm	2,300 mm	2,650 mm
Potencia por motor (6 motores)	100 kW	100 kW	120 kW	120 kW
Voltaje	DC 600 V/750 V	DC 750 V	DC 750 V	DC 600 V/750 V
Velocidad máxima	70 km/h	70 km/h	70 km/h	70 km/h
Ancho de vía	1435 mm	1435 mm	1435 mm	1435 mm
Capacidad de pasajeros	218	258	215	250
Peso en vacío	45 t	48 t	45 t	Sin información

En comparación con los trenes actuales que circulan en Costa Rica, como se puede apreciar en las Tablas 7, 8 y 9, los Avenio tienen capacidad para transportar cerca de 250 personas en cada unidad, mientras que una unidad de tren de combustión interna en Costa Rica puede llevar a 376 pasajeros. Por otra parte, en cuanto a la potencia del motor, cada motor de la unidad del Avenio tiene una capacidad de 100 kW a 120 kW, lo que, al sumar los seis motores, da una potencia de entre 600 kW y 720 kW por unidad. En contraste, de los trenes de CI en Costa Rica, las unidades Apolo poseen motores con capacidades similares, de 132 kW, aunque solo disponen de dos de ellos. Por otro lado, los trenes DMU para Costa Rica están equipados con motores eléctricos de 390 kW cada uno, conectados a cada bogie, lo que da un total de 780 kW por unidad.

Por otra parte, en cuanto a sus dimensiones, ambos trenes son similares, con longitudes que oscilan entre los 34.3 m y los 39 m, siendo los trenes Avenio estudiados cercanos a los 36 m. En cuanto al peso, se tomó como referencia las 45 toneladas de los trenes Avenio, el cual es bastante bajo en comparación

con las 66 toneladas de los Apolo 2400 y las 73 toneladas del DMU para Costa Rica. Esta diferencia puede deberse a la complejidad del equipo que requieren los trenes de combustión, especialmente en lo que respecta a su transmisión, el tamaño de su motor y el generador de la unidad de potencia.

En cuanto a las desventajas que poseen los Avenio, se puede mencionar el ancho de vía, ya que están fabricados para anchos de vía estándar de 1 435 mm, lo cual dificultaría la adquisición de estos vehículos para las rutas ferroviarias existentes en Costa Rica.

## **FLEXITY**

Para estudiar las especificaciones técnicas de este tren de tipo bidireccional, se consideraron especificaciones técnicas de diferentes modelos utilizados en varios países y que fueron comprados a la empresa Bombardier. En el 2021, el área de transporte ferroviario de Bombardier pasó a formar parte de Alstom [52].

Tabla 12: Características generales del tren Flexity-Alstom [53]

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Fabricante	Alstom
Longitud de vehículo	33 m
Altura	3,620 m
Módulos	3 por unidad
Anchura de caja	2,650 m
Ancho de vía	1435 mm
Diámetro de rueda	630 mm
Carga máxima por eje	8,5 t
Velocidad máxima	70 km/h
Potencia del motor	120 kW
Cantidad motores	6
Voltaje de alimentación	750 V (DC)
Servicio eléctrico del freno	Regenerativo
Máxima pendiente	Sin información
Capacidad de pasajeros	220
Peso en vacío	48 t

En la siguiente tabla, se resumen las características técnicas de diferentes Flexity utilizados en varios países.

Tabla 13: Características específicas de diferentes trenes FLEXITY en varios países. [54] [55] [56] [57].

<b>Tipo, ciudad y país</b>	<b>FLEXITY Swift, Rotterdam, Países Bajos</b>	<b>FLEXITY 2 tram, Blackpool, Reino Unido</b>	<b>FLEXITY Outlook, Ginebra, Suiza.</b>	<b>FLEXITY Classic, Krakow, Polonia</b>
<b>Fabricante</b>	Bombardier	Bombardier	Bombardier	Bombardier
<b>Longitud de vehículo</b>	42,7 m	32,2 m	42 m	32,83 m
<b>Altura</b>	3,705 m	3,42 m	3,67 m	3,6 m
<b>Módulos</b>	3 por unidad	5 por unidad	7 por unidad	3 por unidad
<b>Anchura de caja</b>	2,66 m	2,65 m	2,3 m	2,4 m
<b>Ancho de vía</b>	1435 mm	1435 mm	1000 mm	1435 mm
<b>Diámetro de rueda</b>	780 mm	600 mm	560 mm	600 mm
<b>Bogies</b>	4	3	4	4
<b>Carga máxima por eje</b>	12 t	9,6 t	94 kN	78,1 kN
<b>Velocidad máxima</b>	100 km/h	70 km/h	70 km/h	80 km/h
<b>Potencia del motor</b>	130 kW	120 kW	85 kW	105 kW
<b>Cantidad motores</b>	8 (2 por bogie)	2	3	2
<b>Voltaje de alimentación</b>	DC 750 V	DC 600 V	DC 600 V	DC 600 V
<b>Servicio eléctrico del freno</b>	Regenerativo	Regenerativo	Regenerativo	Regenerativo
<b>Freno magnético</b>	105 kN	81 kN	60 kN	66 kN
<b>Máxima pendiente</b>	4,5 %	6 %	7 %	6 %
<b>Capacidad de pasajeros</b>	270	222	237	224
<b>Peso en vacío</b>	65,5 t	40,9 t	52 t	Sin información

Para el modelo Flexity, se encontraron características técnicas similares a las de los trenes de combustión interna que existen en Costa Rica, como por ejemplo, los dos trenes disponibles en el país tienen una longitud máxima cercana a los 40 metros, mientras que la del modelo Flexity es de hasta 42.7 metros. Además, estos últimos tienen una altura máxima que ronda los 3.7 metros, por lo que son más bajos que los trenes DMU para Costa Rica.

Las unidades del modelo Flexity tienen anchos de vía variados en las diferentes ciudades donde circulan, como es el ejemplo del Flexity Outlook de Ginebra, que posee un ancho de vía de 1000 mm, sin embargo, actualmente el fabricante Alstom solo ofrece este modelo con un ancho de vía estándar [53].

Al comparar la potencia de los trenes, se encuentra que los Flexity tienen motores de alrededor de 120 kW de potencia con diferentes configuraciones en los *bogies*, como mínimo 2 u 8 por unidad. Los motores de los trenes de Costa Rica, por el contrario, como se habló anteriormente, tienen capacidades de 390 kW, lo que también afecta en su peso, que es de 73 t para el caso de los DMU para Costa Rica. Por su parte, el Flexity Swift de Rotterdam, el cual posee una longitud de vehículo similar, tiene un peso en vacío de 65.5 t. Esto permite que dicho Flexity pueda transportar a 270 pasajeros, mientras que el DMU para Costa Rica puede movilizar a 376.

En cuanto a la pendiente máxima soportada, los Flexity superan el 7%, lo cual hace que el tren sea apto para soportar la pendiente máxima de la línea férrea de Costa Rica, que es de 4%.

### Citadis Dualis

El tren tipo tranvía de peso ligero es fabricado por la empresa Alstom de Francia, y fue considerado en el presente estudio debido a sus capacidades y características técnicas similares a las de los trenes de Costa Rica. A continuación, se muestran dichas características técnicas generales que pueden servir de referencia para esta opción.

Tabla 14: Características generales de los trenes Citadis Dualis del fabricante Alstom. [58]

Característica	Valor
Fabricante	Alstom
Longitud de vehículo	42 m y 52 m
Altura	3,5 m
Módulos	4 y 5 por unidad
Anchura de caja	2,4 y 2,65 m
Ancho de vía	1435 mm
Diámetro de rueda	Sin información
Carga máxima por eje	11,5 t
Velocidad máxima	100 km/h
Potencia del motor	150 kW
Cantidad motores	6
Voltaje de alimentación	DC 750 V
Servicio eléctrico del freno	Regenerativo
Freno	Eléctrico, electrohidráulico y electromagnético
Máxima pendiente	6.5 %
Capacidad de pasajeros	251-292
Peso en vacío	77 t

Seguidamente, se muestran dos casos de trenes Citadis Dualis de Japón y Alemania. Para estos escenarios, no se especifica la pendiente máxima, sin embargo, se toma como referencia la que se encuentra en la Tabla 14, que indica que tienen la capacidad de soportar una pendiente de hasta el 6,5%. No se encontraron más datos acerca de otros trenes Citadis Dualis en otros países.

Tabla 15: Características específicas de casos reales de los trenes Citadis Dualis [59] [60].

Tipo, ciudad y país	Tram-Train Citadis Dualis, Japón	Regio Citadis, Kassel, Alemania
Fabricante	Alstom	Alstom
Longitud de vehículo	42 m	36762 mm
Altura	3500 mm	3650 mm
Módulos	4 módulos	4
Anchura de caja	2400 mm	2650 mm
Ancho de vía	1435 mm	1435
Diámetro de rueda	Sin información	Sin información
Bogies	5	4
Carga máxima por eje	11,5 t	Sin información
Velocidad máxima	100 km/h	100 km/h
Potencia del motor	150 kW	Sin información
Cantidad motores	6	4 + potencia Diésel-eléctrico
Voltaje de alimentación	DC 750 V	DC 750 V
Máxima pendiente	Sin información	Sin información
Capacidad de pasajeros	251	139
Peso en vacío	77 t	Sin información

En comparación con los trenes de combustión interna de pasajeros que existen en Costa Rica, los Citadis Dualis tienen longitudes muy parecidas, que rondan entre 36 y 42 metros; y en cuanto a la altura, los Citadis Dualis son más bajos que ambos trenes usados en Costa Rica.

Con respecto a los motores, los Citadis poseen seis de 150 kW cada uno, lo que suma una potencia de 900 kW, exceptuando el de Kassel, que tiene incluido un sistema de potencia diésel-eléctrico.

El peso del Citadis Dualis es de 77 toneladas, lo que refleja que es un tren bastante pesado. Al compararlo con los trenes de CI de Costa Rica, se observa un peso similar, lo cual podría significar una desventaja en su operación.

## URBOS-CAF

La compañía CAF es una multinacional con más de 100 años de trayectoria. Entre sus áreas de especialización se encuentran los servicios ferroviarios y de equipos rodantes, desarrollando ingeniería en diseño de productos y materiales. Entre sus equipos rodantes, están los Urbos 100, los Urbos 1 y los Urbos 3, que son equipos de tipo ligero, y que pueden alcanzar velocidades de hasta 100 km/h [61]. En el presente estudio, se toman en cuenta como opción y sus características se muestran seguidamente.

Tabla 16: Características específicas de casos reales de los trenes Urbos de la fabricante CAF [62] [63] [64]

Tipo, ciudad y país	Urbos 100, Kaohsiung, Taiwán	Urbos 100 Sporvein's SL18, Oslo, Noruega	Urbos 2, Sevilla y Vélez Málaga, España	Urbos 1, Bilbao, España
Fabricante	CAF	CAF	CAF	CAF
Longitud de vehículo	34166 mm	34166 mm	31260 mm	24405 mm
Altura	Sin información	Sin información	3385 mm	3300 mm
Módulos	5	5	Sin información	3
Composición	Mc-S-T-S-Mc	Mc-S-T-S-Mc	Sin información	Mc-T-Mc
Anchura de caja	2650 mm	2650 mm	2650 mm	2650 mm
Ancho de vía	1435 mm	1435 mm	1435 mm	1000 mm
Bogies	3	3	Sin información	3
Sistema eléctrico	Catenaria-batería	Catenaria	Catenaria	Catenaria
Velocidad máxima (ACR/Catenary)	50/70 km/h	70 km/h	70 km/h	70 km/h
Potencia total	Sin información	Sin información	488 kW	400 kW
Motores	Dos bogies motorizados	Dos bogies motorizados	Sin información	Sin información
Voltaje de alimentación	750 V (DC)	750 V (DC)	750 V (DC)	750 V (DC)
Servicio eléctrico del freno	Regenerativo	Regenerativo	Regenerativo	Regenerativo
Máxima pendiente	Sin información	Sin información	Sin información	Sin información
Capacidad de pasajeros	250	220	275	192
Peso en vacío	Sin información	Sin información	43,26 t	Sin información

En la Tabla 16, se muestran cuatro tipos de dichos trenes, sin embargo, uno de los que se estudiaron trabaja con el sistema de catenaria-batería. Este tipo también se incluyó en el estudio para dar un punto de valor en la comparación de las distintas características técnicas con las demás opciones.

Al contrastar estos cuatro trenes con los de CI del INCOFER, se observa una diferencia significativa en cuanto a la longitud. Los modelos Urbos son considerablemente más cortos y tienen una altura inferior desde el riel hasta el techo en comparación con los de INCOFER. En lo que respecta a la potencia, aunque la información disponible sobre los Urbos es limitada, se puede destacar que su potencia total eléctrica oscila entre 400 kW y 488 kW. En contraste, los DMU de INCOFER alcanzan un aproximado de 780 kW gracias a sus dos módulos de potencia.

Finalmente, en lo que se refiere al peso, los Urbos tienen un peso aproximado de 43 toneladas, lo que los hace considerablemente más ligeros que los DMU, que pesan alrededor de 73 toneladas, o que los Apollo 2400, que tienen un peso de 66 toneladas. Esta diferencia los convierte en vehículos más ligeros y eficientes en comparación con los trenes de combustión interna de características similares.

### Citylink-Stadler

Este modelo de tren ligero bidireccional de la fabricante Stadler es un tranvía multiarticulado, y es una opción viable para Costa Rica debido a que pueden ser de vía estrecha o de vía estándar y pueden

ser fabricados con diferentes especificaciones, como tener una pendiente extrema que pueda soportar el material rodante [65]. Por consiguiente, se evaluaron tres casos en diferentes países, y sus especificaciones técnicas se pueden observar en la Tabla 17.

Tabla 17: Características específicas de casos reales de los trenes Citylink de la fabricante Stadler [66] [67] [68].

<b>Tipo, ciudad y país</b>	<b>Citylink Tren-tram, Chemnitz, Alemania</b>	<b>Citylink NET, Karlsruhe, Alemania</b>	<b>Citylink Tren-tram, Alicante L9, España</b>
<b>Fabricante</b>	Stadler	Stadler	Stadler
<b>Longitud de vehículo</b>	37200 mm	37200 mm	37510 mm
<b>Altura</b>	3990mm	3590 mm	3800 mm
<b>Módulos</b>	3	3	3
<b>Composición</b>	Bo'2'2'Bo'	Bo'2'2'Bo'	Bo'2'2'Bo'
<b>Anchura de caja</b>	2650 mm	2650 mm	2550 mm
<b>Ancho de vía</b>	1435 mm	1435 mm	1000 mm
<b>Diámetro de rueda</b>	720 mm	680 mm	720 mm
<b>Bogies</b>	4	4	4
<b>Carga máxima por eje</b>	Sin información	Sin información	Sin información
<b>Sistema de potencia</b>	Catenaria +powerback diésel-eléctricos	Catenaria	Catenaria/ Diésel-eléctrico
<b>Velocidad máxima</b>	100 km/h	80 km/h	100 km/h
<b>Potencia por motor</b>	145 kW	145 kW	145 kW
<b>Motores</b>	6	4	4
<b>Voltaje de alimentación</b>	600/750 V (DC)	750 V (DC)	750 V (DC)
<b>Servicio eléctrico del freno</b>	Sin información	Sin información	Sin información
<b>Máxima pendiente</b>	Sin información	Sin información	6 %
<b>Capacidad de pasajeros</b>	228 (4 pers./m <sup>2</sup> )	219 (4 pers./m <sup>2</sup> )	269 (4 pers./m <sup>2</sup> )
<b>Peso en vacío</b>	Sin información	Sin información	Sin información

El modelo Citylink, fabricado por Stadler, tiene una capacidad de transporte superior a 269 pasajeros, la cual es inferior a la que ofrece el DMU utilizado en Costa Rica. Por su parte, se encontró que un modelo de Citylink con tres módulos tiene un peso en vacío de 73,22 toneladas, esto debido al uso de baterías para zonas de la línea donde no se dispone de catenaria [69]. Sin embargo, se ha considerado que los modelos Citylink que operan en Chemnitz y Alicante emplean sistemas mixtos de catenaria y diésel-eléctrico, lo cual podría resultar en un peso mayor y en un aumento de los costos operativos debido a la complejidad del sistema de tracción dual.

En cuanto a la potencia, el modelo Citylink dispone de cuatro motores con una potencia de 145 kW por unidad, lo que le otorga un total de 580 kW. Esta cifra es inferior a los 750 kW del DMU utilizado en Costa Rica, y podría implicar una menor capacidad de tracción para el Citylink en las condiciones operativas y geográficas de las vías férreas costarricenses.

Respecto a sus dimensiones, el Citylink tiene una longitud comparable a la de los DMU costarricenses y los Apolo 2400, con medidas aproximadas entre los 34 y 39 metros. La altura de los Citylink también se considera adecuada en comparación con los trenes que operan en Costa Rica, mientras que la diferencia en el ancho de caja entre los modelos es poco significativa.

### **S70-Siemens**

Por último, se evaluaron las características técnicas de los trenes modelo S70, de piso bajo, conocidos principalmente en Estados Unidos. Estos tienen la capacidad de soportar pendientes de hasta un 7%, lo cual es un aspecto valioso en la presente evaluación. En la Tabla 18, se observan las características específicas de diferentes trenes que operan en Estados Unidos.

Tabla 18: Características específicas de casos reales de los trenes S70 de la fabricante Siemens [70] [71] [72].

Tipo, ciudad y país	S70, Minneapolis/ St. Paul, Estados Unidos	S70, Portland, Estados Unidos	S70, Atlanta, Estados Unidos
<b>Fabricante</b>	Siemens	Siemens	Siemens
<b>Longitud de vehículo</b>	28742 mm	29090 mm	24110 mm
<b>Altura</b>	3870 mm	3870 mm	3840 mm
<b>Módulos</b>	3	3	3
<b>Composición</b>	Sin información	Sin información	Sin información
<b>Anchura de caja</b>	2650 mm	2650 mm	2654 mm
<b>Ancho de vía</b>	1435 mm	1435 mm	1435 mm
<b>Diámetro de rueda</b>	Sin información	Sin información	Sin información
<b>Bogies</b>	3	3	3
<b>Carga máxima por eje</b>	Sin información	Sin información	Sin información
<b>Sistema de potencia</b>	Catenaria	Catenaria	Catenaria
<b>Velocidad máxima</b>	88 km/h	88,5 km/h	56 km/h
<b>Potencia por motor</b>	130 kW	130 kW	130 kW
<b>Motores</b>	4	4	4
<b>Voltaje de alimentación</b>	750 V (DC)	750 V (DC)	750 V (DC)
<b>Máxima pendiente</b>	7 %	7 %	7 %
<b>Capacidad de pasajeros</b>	231 (6 pers./m <sup>2</sup> )	243 (6 pers./m <sup>2</sup> )	195 (6 pers./m <sup>2</sup> )
<b>Peso en vacío</b>	48,8 t	45,8 t	43,7 t

Estos modelos S70 no cuentan con una gran capacidad de pasajeros, ya que puede variar entre 195 y 243 por unidad. Asimismo, son capaces de transportar 6 personas por metro cuadrado, por lo que su capacidad efectiva se reduce a aproximadamente 130-162 pasajeros, lo que es significativamente inferior a la de los trenes de combustión interna de Costa Rica, que ronda entre 226-376 pasajeros con una relación 4 personas/m<sup>2</sup>. Esto responde a que los S70 son considerados vehículos ferroviarios ligeros para la movilización de poca cantidad de pasajeros, principalmente en Estados Unidos [73].

Por otro lado, a pesar de ser más cortos, los S70 tienen una gran capacidad para soportar pendientes de hasta 7% gracias a su potencia de 130 kW por motor, lo que suma un total de 520 kW distribuidos en cuatro motores, esto para soportar un peso en vacío de hasta 48.8 t. Al contrastar este dato con las características de los trenes de Costa Rica, se puede determinar que son más ligeros, lo que permitiría ahorrar más energía.

### **Comparación de precios.**

A continuación, se recopilaron datos, provenientes de diferentes fuentes, sobre los costos de adquisición de cada uno de los trenes anteriormente estudiados, con sus respectivas ciudades. Algunos de los precios no fueron encontrados, por lo que se procedió a mantener la casilla respectiva en blanco para dichos casos. Se calculó el promedio del precio del modelo en las diferentes ciudades donde se adquirió, con el fin de obtener un valor aproximado del costo del modelo específico. Es importante aclarar que, para el modelo Citadis Dualis en Tokio, Japón, no se logró obtener el precio exacto. En su lugar, se utilizó el valor del mismo modelo adquirido por la compañía SNCF en Francia, ya que solo se disponía de una referencia del costo de un tren Citadis Dualis, lo que generaba una cifra ambigua.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los precios corresponden al momento de la compra por las diferentes instituciones en cada país, y algunos de los trenes tienen más de quince años de haberse adquirido, por lo que dicho costo puede variar en la actualidad. No obstante, dicha variación no fue contemplada para el presente estudio.

Tabla 19: Costos de adquisición de una unidad de tren ligero en diferentes ciudades según su modelo .

<b>Avenio</b>	<b>Avenio GTA8 Nuremberg, Alemania [74]</b>	<b>Avenio Copenhague, Dinamarca</b>	<b>Avenio, Múnich, Alemania [75]</b>	<b>Avenio Bremen, Alemania [76]</b>
<b>Costo adquisición aprox.</b>	\$4 066 598,55	\$ 4 379 120	\$3 082 000,00	\$2 987 012,00
<b>Promedio</b>	<b>\$ 3 628 682,64</b>			
<b>Flexity</b>	<b>FLEXITY Swift, Rotterdam, Países Bajos [77]</b>	<b>FLEXITY 2 tram, Blackpool, Reino Unido [78]</b>	<b>FLEXITY Outlook, Ginebra, Suiza.</b>	<b>FLEXITY Classic, Krakow, Polonia [79]</b>
<b>Costo adquisición aprox.</b>	\$5 562 500,00	\$2 708 567,00	Sin información	\$3 166 666,00
<b>Promedio</b>	<b>\$3 812 577,67</b>			
<b>Citadis Dualis</b>	<b>Citadis Dualis, SNCF [80]</b>		<b>Regio Citadis, Kassel, Alemania [81]</b>	
<b>Costo adquisición aprox.</b>	\$5 906 960,00		\$7 119 996,00	
<b>Promedio</b>	<b>\$6 513 478,00</b>			
<b>Urbos</b>	<b>Urbos 100, Kaohsiung, Taiwán</b>	<b>Urbos 100 Sporvein's SL18, Oslo, Noruega [82]</b>	<b>Urbos 2, Sevilla y Vélez Málaga, España [83]</b>	<b>Urbos 1, Bilbao, España [84]</b>
<b>Costo adquisición aprox.</b>	Sin información	\$2 546 103,00	\$2 630 443,00	\$1 661 332,00
<b>Promedio</b>	<b>\$2 279 292,67</b>			
<b>Citylink</b>	<b>Citylink Tren-tram, Chemnitz, Alemania [85]</b>	<b>Citylink NET, Karlsruhe, Alemania [86]</b>	<b>Citylink Tren-tram, Alicante L9, España [87]</b>	
<b>Costo adquisición aprox.</b>	\$5 814 663,00	\$7 653 835,00	\$6 608 411,50	
<b>Promedio</b>	<b>\$6 692 303,17</b>			
<b>S70</b>	<b>S70, Minneapolis/ St. Paul, Estados Unidos [88]</b>	<b>S70, Portland, Estados Unidos [89]</b>	<b>S70, Atlanta, Estados Unidos [90]</b>	
<b>Costo adquisición aprox.</b>	\$4 370 370,00	\$4 055 555,00	\$4 300 000,00	
<b>Promedio</b>	<b>\$4 241 975,00</b>			

Como se mencionó anteriormente, se buscó un aproximado del costo de adquisición de los seis modelos, lo que dio como resultado que los trenes Citylink y los Citadis Dualis son los más caros; por el contrario, los modelo Urbos y los Avenio fueron los que resultaron con un costo menor. El promedio entre los seis modelos es de \$4.5 M, aproximadamente.

## Escogencia de tren eléctrico ligero.

En cuanto a las características técnicas de los seis modelos analizados, todos cumplen con las especificaciones mínimas para que puedan viajar por las líneas férreas del país. Empero, en todos los casos, existe la desventaja de que poseen un ancho de vía menor al que se encuentra Costa Rica, que es de 1067 mm, más bajo que el estándar recomendado a nivel mundial (1435 mm). Esto implicaría un costo de adquisición mayor debido a la necesidad de modificar el sistema, además de que no se trata de un ancho de vía estrecho, que es de 1000 mm. A pesar de ello, los modelos estudiados tienen la opción de modificarse, si fuera el caso, por las diferentes empresas fabricantes.

El DMU para Costa Rica alcanza una velocidad máxima de 70 km/h-80 km/h, lo cual es superado o igualado por todos los modelos que se evaluaron. Del mismo modo, la potencia de todos los modelos es cercana a la que poseen los DMU para Costa Rica.

Un aspecto importante que se consideró para la escogencia de un tren eléctrico ligero para este estudio es el peso en vacío de las unidades férreas. Al tratarse de vehículos eléctricos, estos tienen menor peso que una locomotora de diésel; además de que los trenes eléctricos evaluados cuentan con sistemas de potencia de tipo catenaria, lo cual no requiere de una batería grande que almacene toda la energía. Los DMU para Costa Rica tienen un peso en vacío de 73 toneladas, mientras los trenes eléctricos evaluados tienen un peso promedio de 50 toneladas. Por su parte, el Citadis Dualis es un modelo bastante pesado, con 77 toneladas, lo que supera el peso de los DMU para Costa Rica. Esto no resulta favorable para el estudio, ya que se procura que el costo de operación no sea elevado; dado que un mayor peso requiere más potencia, el Citadis Dualis no es una opción recomendable para evaluar.

Para continuar con los pesos, el Citylink es un modelo con un peso en vacío de aproximadamente 73 toneladas, sin embargo, esto responde al uso de baterías de almacenamiento como un modelo bimodal, lo que conlleva un peso mayor. A pesar de ello, no se descartó por dicha razón, puesto que también puede trabajar únicamente con catenaria, lo que podría reducir un poco su peso.

En cuanto a la eficiencia energética, los seis modelos cuentan con sistemas de control de energía y freno regenerativo, que permite acumular energía en baterías disponibles para ello dentro del sistema de potencia.

Finalmente, los costos de adquisición de los modelos varían considerablemente. El modelo con el costo más bajo fue el Urbos, de la fabricante CAF, con un precio aproximado de \$2.279.292,67 por unidad. Por otro lado, el modelo Avenio tuvo un costo de adquisición promedio de \$3.378.536,85 por unidad, lo que también lo convierte en una opción atractiva de compra.

Una ventaja de realizar este estudio con alguno de estos dos modelos es que existe un documento de Declaración Ambiental del Producto (EPD, por sus siglas en inglés, Environmental Product Declaration) de acuerdo con la norma ISO 14025. Por lo tanto, se eligieron los trenes modelo Avenio y Urbos 100 para elaborar el estudio de prefactibilidad. El diseño de estos trenes se centra en la sostenibilidad, buscando que su uso sea lo más eficiente posible. Además, la capacidad energética de ambos es efectiva, y cuentan con materiales y equipos alineados con los principios de sostenibilidad del producto.

El Urbos 100 tiene la capacidad de recuperar energía mediante su sistema de freno regenerativo cuando el vehículo desciende. Asimismo, cuenta con un sistema de consumo energético eficiente, fácil de limpiar y de mantener. Aunado a esto, posee un sistema de control inteligente que regula el consumo de la catenaria según la demanda. Por otra parte, este modelo de la fabricante CAF presenta una estructura liviana, elaborada con material compuesto y aluminio, lo que hace que sea aún más liviano [62]. En la Figura 11, se muestra el Urbos 100 en la ciudad de Oslo.



Fig. 11. Urbos 100 en la ciudad de Oslo [63].

Por otro lado, la empresa Siemens, con 130 años de experiencia, ha sido pionera en la fabricación de tranvías eléctricos. Su modelo Avenio se adapta a infraestructuras antiguas y puede operar sin líneas de contacto, mejorando el paisaje urbano. Además, es eficiente a nivel energético, por lo que ayuda a reducir las emisiones de carbono y los costos del ciclo de vida, contribuyendo a que las ciudades sean más verdes. Adicionalmente, el Avenio también cuenta con freno regenerativo y una alta capacidad de potencia, lo que le permite subir pendientes con mayor facilidad y transportar una mayor cantidad de pasajeros. A pesar de estas características, el tren sigue siendo ligero, con un peso similar al del Urbos 100 [73]. En la Figura 12, se muestra el Avenio-Siemens.



Fig. 12. Avenio-Siemens en la ciudad de Múnich [50].

## Objetivo 2.

Determinar la infraestructura eléctrica preliminar necesaria por medio de datos teóricos de diversos proyectos desarrollados en otros países para el suministro eléctrico de una eventual implementación del tren eléctrico ligero.

### Aspectos generales.

Para el desarrollo de una infraestructura eléctrica con base en catenarias para todo el sistema ferroviario existente en el GAM, es necesario realizar un estudio exhaustivo que analice las pendientes de cada tramo, con el fin de calcular el consumo de potencia y de especificar los tipos de materiales necesarios. El presente análisis toma como referencia el estudio de ingeniería para la implementación de un tren rápido de pasajeros en Costa Rica, el cual detalla la electrificación pertinente. Sin embargo, este estudio de prefactibilidad se centra únicamente en la electrificación, sin abordar la construcción de vías dobles ni pasos elevados. A continuación, se muestra con mayor claridad la vía ferroviaria de pasajeros en el GAM con diferentes puntos de referencia.

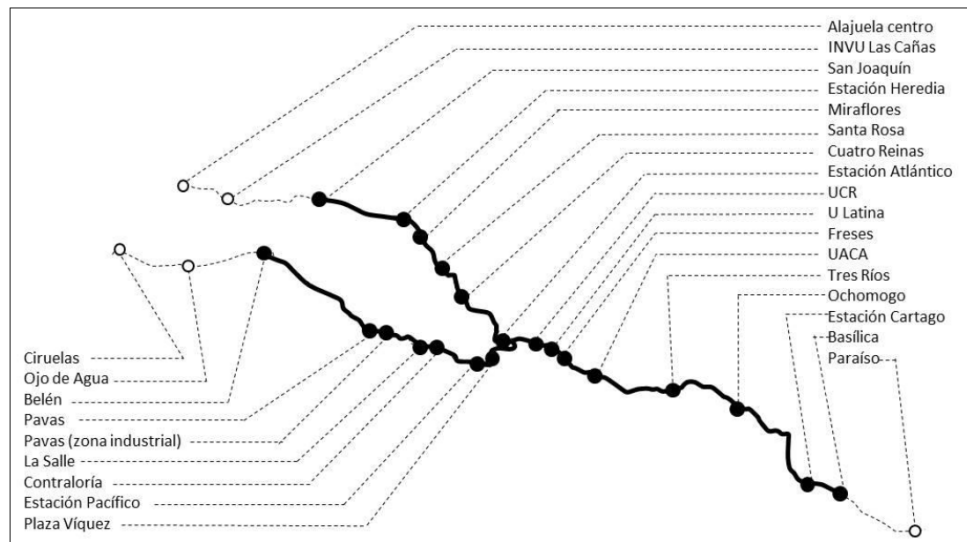


Fig. 13. Trazado general y puntos de referencia del tren interurbano en Costa Rica [91].

En la Tabla 20, se presenta la distancia total de la línea ferroviaria a la cual se le aplicaría la instalación eléctrica por medio de catenaria. Estas distancias totales fueron obtenidas de manera aproximada por medio del *software* Google Earth Pro, seleccionando los puntos de cada ruta.

Tabla 20: Distancias totales de las vías férreas del tren de pasajeros en el GAM [92].

Ruta	Distancia (km)
Estación Los Ángeles-Estación Atlántico	21,74
Estación Atlántico-Estación Alajuela	20,84
Eación Atlántico-Estación San Antonio de Belén	17,28
<b>Total</b>	<b>59,86</b>

Por otra parte, para evaluar el consumo máximo del tren eléctrico, se consideraron los perfiles de elevación de las rutas previamente presentadas, utilizando el *software* Google Earth Pro [92]. A partir de esta información, las rutas se exportaron en formato KML, con el propósito de obtener un archivo CSV mediante la página web GPS Visualizer. Esto permitió analizar las pendientes y sus ángulos correspondientes en diferentes puntos de las tres rutas valoradas. Las tablas resultantes se encuentran en la sección de anexos.

## Consideraciones del tren eléctrico.

Seguidamente, para encontrar un esquema de la instalación eléctrica, fue necesario tomar en cuenta la potencia máxima del sistema de propulsión del tren eléctrico, y, además, su peso total con un cálculo aproximado del peso máximo de los pasajeros. Los resultados resultan aproximados a lo que podría ser la potencia necesaria entregada de la red eléctrica.

Para desarrollar lo anterior, se ejecutó un cálculo aproximado con los pesos de cada modelo, considerando tanto el peso aproximado en vacío como el del tren con personas. Para este último, se utilizó un promedio de 75 kg por persona como referencia.

Tabla 21: Pesos totales de los modelos en vacío con capacidad de pasajeros máxima.

Modelo	Avenio-Siemens	Urbos-CAF
Peso en vacío promedio (t)	46	43,26
Capacidad máxima de personas	235,25	234,25
Peso total de personas (t)	19,45	19,37
<b>Peso total (t)</b>	<b>65,45</b>	<b>62,63</b>

Seguidamente, se desarrolló una tabla con las potencias máximas de cada uno de los modelos, lo cual se basó en la información recopilada anteriormente en el presente estudio.

Tabla 22: Potencia máxima de cada modelo.

Modelo	Avenio-Siemens	Urbos-CAF
Potencia máxima (kW)	600	488

Un aspecto que se debe considerar con respecto a la evaluación del consumo del eventual tren eléctrico liviano es que, para este estudio, se tomará como referencia solo un tren pasando en un punto en específico a la vez de manera simplificada, por lo que el estimado para la instalación eléctrica será generalizado.

## Estudio de instalaciones eléctricas en proyectos de otros países.

Para esta sección, se estudiaron diversos proyectos de trenes eléctricos disponibles en otros países. Algunos de los casos analizados fueron de trenes de alta velocidad, los cuales se utilizaron como referencia para algunos de los cálculos realizados.

### Proyecto Bobadilla-Algeciras (España).

Esta línea se ubica en el sur de España y abarca desde la ciudad de Bobadilla hasta Algeciras, tiene unos 176,2 km de longitud y es de vía única. Este tramo se alimenta de corriente alterna al ser de alta velocidad y de largas distancias, la cual se acopla mejor a este tipo de líneas que la corriente directa.

La tensión nominal es de 25 kV a 50 Hz mediante un tipo de catenaria tipo CA-200, lo que le permite alcanzar velocidades de 200 km/h. Su sistema eléctrico está acorde a la norma UNE-EN 50182. Además, tiene un cable y un carril principal de retorno [93].

En el estudio de simulación donde se consultaron estos datos, solo se tomó en cuenta un tramo de 73.6 km de Bobadilla a Ronda. En esta sección, se utilizan dos sistemas de transformadores, lo cual es lo recomendado, ya que uno funciona como un grupo de reserva, y el otro alimenta la línea de catenaria. Asimismo, este sistema presenta centros de autotransformadores con dos transformadores de 10 MVA que alimentan diferentes sectores de la línea, además de un transformador de 10 MVA colocado en sistemas intermedios de autotransformación. En la siguiente figura, se muestra el esquema de los transformadores a lo largo de la línea completa [93].

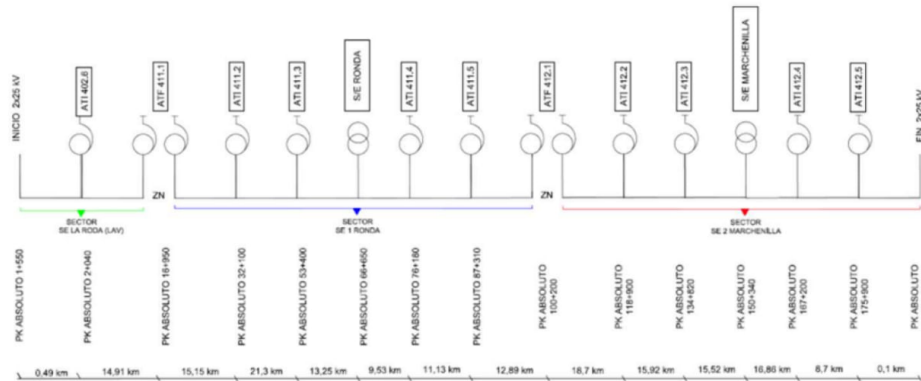


Fig. 14. Esquema ubicaciones elementos línea Bobadilla-Algeciras. [93].

En dicho estudio, es posible analizar una simulación llevada a cabo en el programa CECAT®; este permite valorar todas las características que requiere la línea, en conjunto con las especificaciones técnicas del tren evaluado en la simulación. En él, se indica la cantidad de transformadores en toda la línea, y se evalúan fallas en los transformadores para comprobar el continuo funcionamiento de todo el conjunto sin afectar el funcionamiento de los trenes estudiados [93].

Un aspecto importante obtenido a partir del estudio ejecutado para el presente proyecto corresponde a las variables del peso y de la velocidad del tren con respecto al esfuerzo (kN) y cómo eso afecta la potencia entregada a la locomotora. De este modo, en el estudio de potencia de Bobadilla-Algeciras, se analizó una locomotora S-130 de un tren de pasajeros con una capacidad de potencia de 4800 kW, pero con un peso total de 212 toneladas. En la Figura 15, se observa el comportamiento de la potencia con respecto a la velocidad, en donde se puede apreciar que, a mayor velocidad, el tren requiere de una potencia mayor [93].

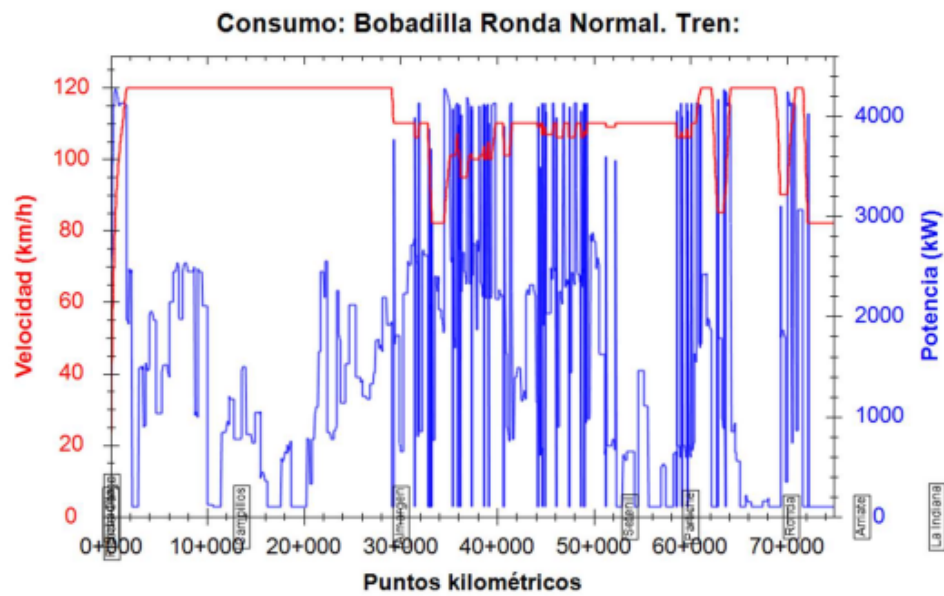


Fig. 15. Valores de consumo locomotora S-130 RENFE [93].

#### Modelado del Tranvía Citadis-302 en Ciudad de Cuenca (Ecuador)

Este proyecto estudia el sistema de tranvía de la ciudad de Cuenca, el cual tiene una longitud de 10 km y posee la capacidad de transportar a 300 pasajeros [31], número que coincide con el modelo estudiado. Del mismo modo, en la vía de Cuenca, se utiliza uno de los modelos analizados anteriormente que tiene características similares, por esta razón, este estudio es adecuado para su análisis en esta sección.

Dicho tranvía tiene la peculiaridad de que, para disminuir el impacto visual en áreas patrimoniales, recurre a un sistema de alimentación por suelo (APS) en ciertas zonas del trayecto. En cuanto a la parte eléctrica, se tiene una alimentación a la línea de 700 V (CC). El sistema de tracción del material rodante contiene cuatro motores con potencia nominal de 120 kW cada uno; es decir, la potencia total del tranvía es de 480 kW [31].

En esa línea de 10 km, se encuentran cinco subestaciones rectificadoras; esto quiere decir que cada subestación alimenta aproximadamente un tramo de 2 km [31], lo cual se considera como normal en este tipo de sistemas. En la siguiente figura, se muestran las potencias en cada subestación.

	Escenario Futuro			Caso Base		
	P. (kW)	P.Max (kW)	P.Max Pico (kW)	P. (kW)	P.Max (kW)	P.Max Pico (kW)
S/Er 1	386,5	1006,4	4451	373,5	1374,9	3730
S/Er 2	457,5	1425	4451	574,5	1443,05	3666
S/Er 3	231,4	712,8	4470	419,5	1206	3811
S/Er 4	405,4	1260	4575	529,1	1439	3811
S/Er 5	342,9	1616	4515	492,6	1616,2	3734
	Perdidas Joule en línea 128,6 kW (5,38%)			Perdidas Joule en línea 91,64 kW (5,02%)		

Fig. 16. Relación de potencias por subestación rectificadora en la línea de tranvía en Cuenca, Ecuador [31].

Por otra parte, a continuación se muestra un diagrama de la interconexión entre las subestaciones de alimentación al sistema y sus cinco subestaciones rectificadoras.

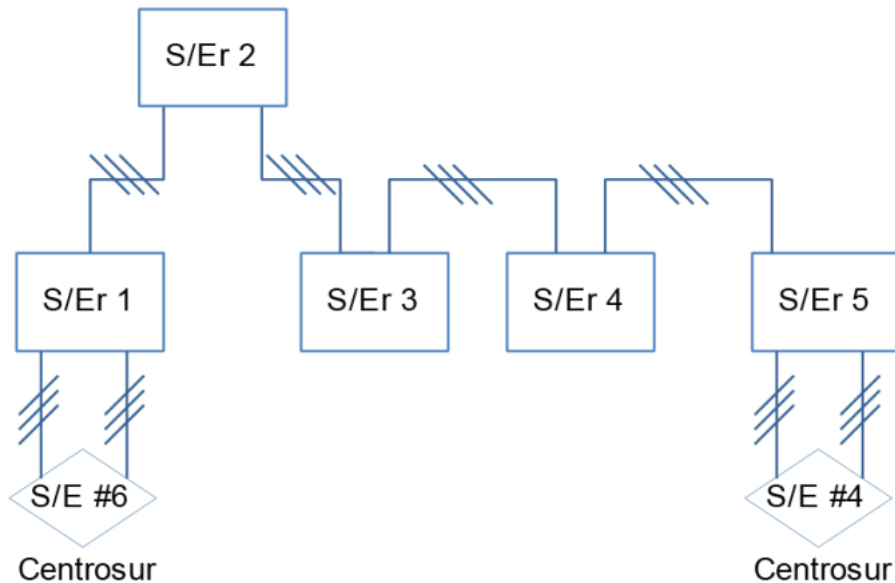


Fig. 17. Interconexión de las S/Er y su alimentación desde S/E de la Centrosur [31].

De igual forma, se obtuvieron datos relacionados con este sistema de tranvía de la región de Cuenca, a partir de la documentación técnica proporcionada por Alsom y otras entidades. Los diferentes grupos rectificadores tienen potencias de 900 kW [94] para soportar las potencias de la línea, las cuales fueron mostradas en la Figura 16. Además, a partir de la Figura 17, se observan las conexiones trifásicas provenientes de las subestaciones 4 y 6 hacia las subestaciones rectificadoras, con tensiones de 22 kV. Estas conexiones, a su vez, distribuyen la alimentación a las demás subestaciones en el mismo nivel de 22 kV [94].

Para entender mejor el esquema presente en la Figura 17, se obtuvo información referente a las funciones de cada subestación. Las S/Er 1 y la S/Er 5 son subestaciones eléctricas para frenado, conectadas en los puntos finales de cada línea. La S/Er 2 alimenta al tranvía mediante catenaria y es una subestación rectificadora intermedia. Las S/Er 3 y 4 son subestaciones rectificadoras intermedias con APS [94].

Los transformadores utilizados en cada subestación son de 1000 kVA con tensión primaria de 22 kV en el primario y 590 V como tensión secundaria con una sobretensión admisible de 10 % a 60 Hz [94].

Finalmente, en el estudio consultado, se realiza una simulación en donde se muestra un esquema sencillo de la conexión de los diferentes elementos, relacionando las subestaciones con la unidad de tracción. Para el presente trabajo, no se tomaron en cuenta los elementos dentro del vehículo, por lo que la Figura 18 solo fue utilizada como referencia.

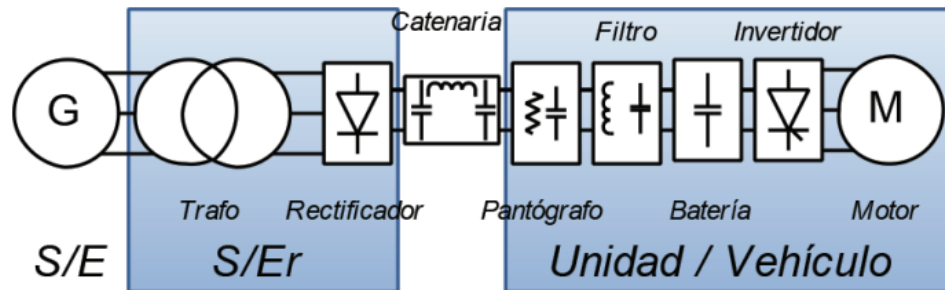


Fig. 18. Elementos de interconexión entre la subestación y la unidad de tracción del tranvía de Cuenca, Ecuador [31].

### Estudio de sistemas de electrificación de Rail Baltica.

Rail Baltica es un proyecto para la implementación de una línea férrea que conecte Polonia, Lituania, Letonia, Estonia y Finlandia, con una extensión de 870 km para un tren de alta velocidad de un máximo de 249 km/h [95].

El documento consultado muestra diferentes tipos de conexión de la catenaria como sistema de alimentación del tren a 2X25 kV con frecuencia de 50 Hz [96]. A continuación, se describe el sistema eléctrico de tracción a partir del estudio.

- **Traction Power Substations (TSS):** Es el sistema que se encarga de recibir alto voltaje de la red eléctrica y disminuye el voltaje al requerido por la línea de catenaria [96].

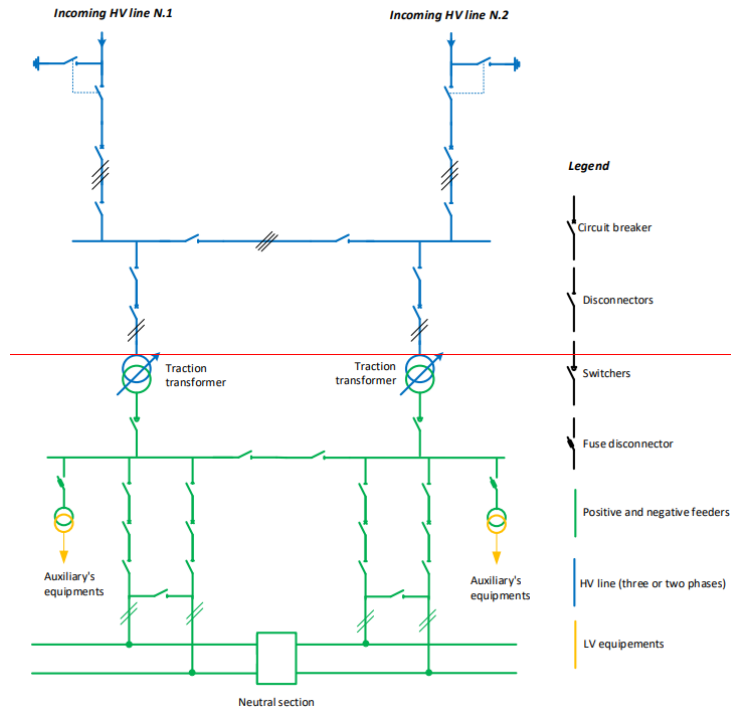


Fig. 19. Diagrama simplificado de la TSS [96].

- **Paralleling Posts (PP):** Al utilizar un autotransformador, este sistema aumenta el voltaje de la catenaria y reduce la corriente de retorno del riel [96].
- **Traction power system (TPS):** Es la combinación de la TSS, la PP y la Sectioning Paralleling Posts (SPP) que es un sistema que va en correspondencia del seccionamiento del sistema de catenaria llamado Overhead Contact Line System (OCS) [96].
- **Overhead contact line system (OCS):** Este sistema es el encargado de distribuir la energía eléctrica a los vehículos férreos [96].
- **Traction Power Return System:** Incluye todos los conectores y sistemas de puesta a tierra para las vías electrificadas de retorno [96].

## Instalación eléctrica preliminar para una eventual implementación del tren eléctrico ligero.

A partir de lo que se ha determinado anteriormente en diferentes proyectos, es posible considerar que la instalación eléctrica de un tren eléctrico, en términos generales del circuito, es sencilla, aunque a nivel micro es un sistema complejo con muchas consideraciones necesarias para sus respectivos cálculos. Sin embargo, este factor no será relevante para el presente estudio, ya que superaría significativamente su alcance.

Para el análisis que aquí se desarrolla, se tomó en cuenta, además de los estudios mencionados anteriormente, el libro de *Sistemas ferroviarios: Planificación, ingeniería y explotación*. Su autor sugiere la importancia del estudio y la investigación de diferentes tipos de sistemas para compararlos entre sí y ayudar a la toma de decisiones en los respectivos proyectos. Como ejemplo, se menciona que, para los

trenes metropolitanos, ya sean ligeros o tranvías, en la actualidad se prioriza un sistema de alimentación de corriente continua [27].

Agregado a esto, se consideran tensiones de alimentación de 600, 750, 1200 y 1500 V (DC) para los sistemas ferroviarios mencionados anteriormente. Sin embargo, actualmente se están estudiando instalaciones en corriente alterna para estos tipos de trenes, pese a que aún no son muy recomendables [27].

Tal y como se pudo apreciar en el caso del tranvía de Cuenca, para sistemas de alimentación de 600 V, las subestaciones alimentan tramos de línea de aproximadamente 2 y 3 kilómetros. A pesar de ello, estas distancias están directamente relacionadas con la cantidad de trenes a los que se le suministra potencia en ciertos momentos, sus potencias y las caídas de tensión de la línea [27]; no obstante, este aspecto no fue abordado en profundidad durante el presente estudio.

Los esquemas eléctricos de potencia para sistemas de tracción en corriente continua son bastante similares en cuanto a sus componentes y controles. Normalmente, pueden estar conectados a las tres fases de la línea de red de la compañía eléctrica. Luego, se ingresa un transformador de alta tensión a la tensión necesaria en la línea de catenaria. Antes de entrar al sistema de catenaria, se instalan rectificadores en estrella para convertir de corriente alterna (CA) a corriente directa (CD), y entra seguidamente a la catenaria para distribuir la potencia a los trenes [27]. A continuación, se muestra un diagrama bastante común de estos sistemas de trenes ligeros.

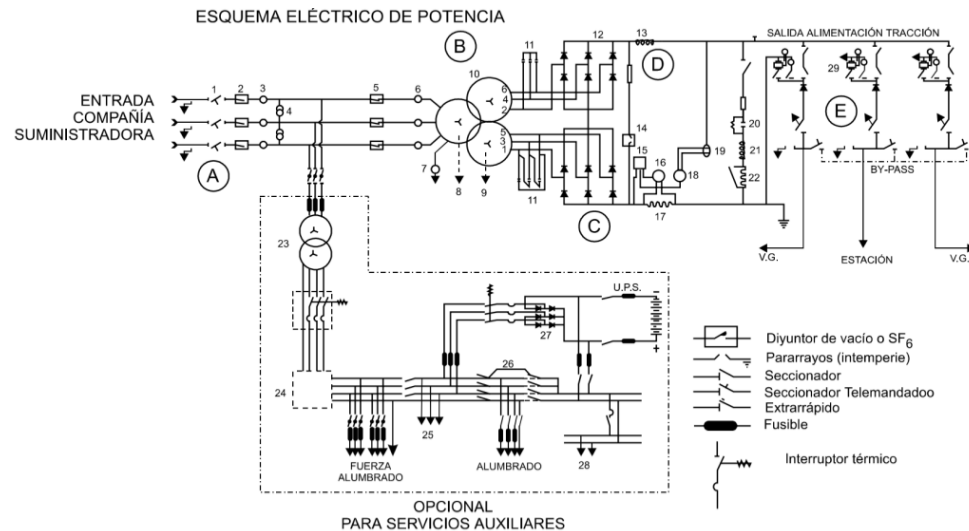


Fig. 20. Esquema eléctrico de potencia común para trenes eléctricos ligeros [27].

A partir del libro en el que se consultó la imagen, a continuación se describe cada uno de los puntos de la Figura 20 [27]:

- **A:** Entrada de alimentación de la compañía suministradora de electricidad.
- **B:** Transformadores de potencia.
- **C:** Puentes rectificadores.
- **D:** Filtros de amortiguamiento.
- **E:** Distribución de energía a la línea de alimentación del tren en corriente directa (CD).

Teniendo lo anterior como base, para el desarrollo del cálculo de un sistema de potencia que incluya las distintas subestaciones en diferentes puntos de la línea, se requiere un perfil de línea con sus respectivas rampas, pendientes entre estaciones, curvas y demás componentes. Por otra parte, es necesario conocer las características del material móvil, sus curvas de esfuerzo en función de la velocidad y los diferentes consumos. Asimismo, se requiere un estudio de las características de explotación, los intervalos de los trenes, sus velocidades y tiempos. Por último, es necesario conocer las diferentes características de la línea aérea y de la vía, con sus respectivas tensiones [27].

En el presente estudio, se evaluaron únicamente consideraciones generales de las tres líneas correspondientes a San José – Alajuela, San José – Belén y San José – Cartago. Para estos casos, se determinaron los perfiles de elevación y, a partir de ello, y con respecto al peso máximo del tren, se calcularon las diferentes potencias preliminares necesarias en diferentes puntos, para determinar la potencia de unas eventuales subestaciones.

El perfil de elevación de cada una de las rutas se obtuvo a partir del software Google Earth, como se mencionó anteriormente. Los datos se extrajeron mediante un archivo KML apto para obtener información a partir de mapas digitales, y luego se ingresó el archivo respectivo a la página web GPS Visualizer, donde se exportó un archivo CSV para poder ingresarlo a un documento de Excel en el que se pudieron analizar mejor los datos. Debido a que las curvas de pendientes generadas en Google Earth no son muy precisas, se optó por suavizarlas mediante Excel QM, por medio de la función de pronósticos de suavizamiento exponencial de tendencia ajustada, definiendo alpha y beta con valores cercanos a 0 para un mayor suavizamiento de la curva necesaria para este tipo de estudio. Los valores de alpha y beta fueron ambos de 0,2.

Por otro lado, se realizaron cálculos en cada una de las rutas con el fin de obtener la fuerza de resistencia y la potencia en tramos de aproximadamente 100 a 300 metros. A continuación, se muestran las ecuaciones de los cálculos realizados.

Primeramente, para la fuerza, se debe obtener un valor con unidades de daN, esto por ser muy utilizada en sistemas ferroviarios. A esta ecuación, se le llama “fuerza de resistencia en rampas” [27]. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$R_{ag} = F_g \cdot i \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

Donde:

- $R_{ag}$  Es la fuerza de resistencia al avance (daN).
- $F_g$  Es la fuerza generada por la gravedad (N).
- $i$  Es la pendiente de la rampa en milésimas por metro ( $mm/m$ ).
- $\alpha$  Es el ángulo de la rampa ( $^\circ$ ).

Para la  $F_g$  se debió calcular de la siguiente forma:

$$F_g = M \cdot g \quad (2)$$

Donde:

- $M$  Es la masa del tren en toneladas (t)
- $g$  Es la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ .

Por otra parte, la pendiente se calculó de la siguiente forma [28]:

$$i = \frac{\Delta H}{DH} \quad (3)$$

Donde:

- $\Delta H$  Es la diferencia de alturas (mm).
- $DH$  Es la distancia horizontal de la rampa (m).

Además, para determinar el  $\alpha$  se calculó lo siguiente:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta H}{\Delta DH}\right) \quad (4)$$

Seguidamente, en cada uno de los tramos seleccionados, se consideró la presencia de una subestación que alimente ese espacio de línea. Para ello, se seleccionó la máxima fuerza de resistencia a rampas en cada tramo. Una vez determinada la fuerza máxima a rampas de cada subestación, se definió el cálculo de resistencia general al avance, el cual se mantiene igual al tratarse del peso y velocidad del tren. A continuación, se muestra el cálculo realizado para la fuerza general al avance [27].

$$R_a = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (5)$$

Donde:

- $R_a$  Es la resistencia general al avance.
- $A$  Es una constante de 1,005 kg por tonelada.
- $B$  Es una constante de 0,018.
- $C$  Es una constante de 0,00136.
- $V$  Es la velocidad en  $km/h$ .

El valor obtenido de esta resistencia fue de 2 408,48 N, el cual fue tomado en cuenta para los cálculos en cada una de las tres rutas (ver anexos).

Finalmente, se obtuvo la potencia a partir de la suma de esas dos resistencias obtenidas anteriormente, y aunado a ello, la Segunda Ley de Newton [27]. Primero, con la suma de las dos resistencias, se obtuvo la fuerza total requerida por el tren.

$$F_{req}(N) = (m \cdot a) + R \quad (6)$$

Donde:

- $m$  Es la masa del tren en kg.
- $a$  Es la aceleración normal del tren en  $m/s^2$  que se tomó como  $1,2m/s^2$  según la especificación técnica de Avenio [97].

A partir de la fuerza requerida, se obtuvo la potencia necesaria por subestación de la siguiente manera.

$$P = F \cdot V \quad (7)$$

Donde:

- $P$  Es la potencia en kW.
- $F$  Es la fuerza requerida por el tren en N.
- $V$  Es la velocidad del tren en  $m/s$ .

Cabe recalcar que, para un estudio completo referente a las fuerzas de resistencia que tiene que superar un tren, se requieren más cálculos, como la resistencia en curvas, la resistencia mecánica, la resistencia aerodinámica y la resistencia debido a la entrada de aire [27]. Sin embargo, estos corresponden a cálculos más complejos que no se tomaron en cuenta para el desarrollo del presente trabajo.

### San José-Alajuela

A continuación, se muestra una gráfica con las curvas suavizadas del perfil de elevación de la ruta desde la estación del Atlántico en San José hasta la estación de Alajuela.

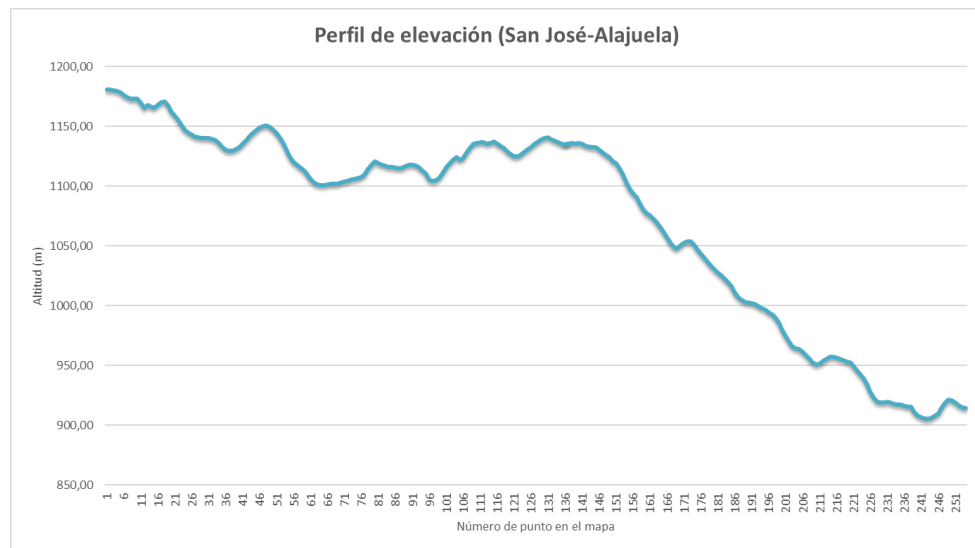


Fig. 21. Perfil de elevación de la ruta San José-Alajuela. Elaboración propia.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la ruta de San José – Alajuela, tiene una distancia total de 20,84 km. Para este caso, se consideraron siete subestaciones para cubrir aproximadamente 3 km. A partir de los cálculos mencionados anteriormente, se obtuvo como resultado las siguientes potencias para cada subestación. Los nombres de cada una de las subestaciones se utilizaron como referencia para el presente estudio.

Tabla 23: Potencia máxima por subestación (SJO-ALA). Elaboración propia.

Subestación	Fuerza requerida (N)	Potencia (kW)
S/E1-A	100 385,71	1 115,40
S/E2-A	107 817,81	1 197,98
S/E3-A	81 274,37	903,05
S/E4-A	115 902,26	1 287,80
S/E5-A	86 513,14	961,26
S/E6-A	116 150,49	1 290,56
S/E7-A	98 273,67	1 091,93

### San José-San Antonio de Belén.

De igual manera, se muestra la gráfica con las curvas suavizadas del perfil de elevación de la ruta que va desde la estación del Atlántico hasta la de San Antonio de Belén.

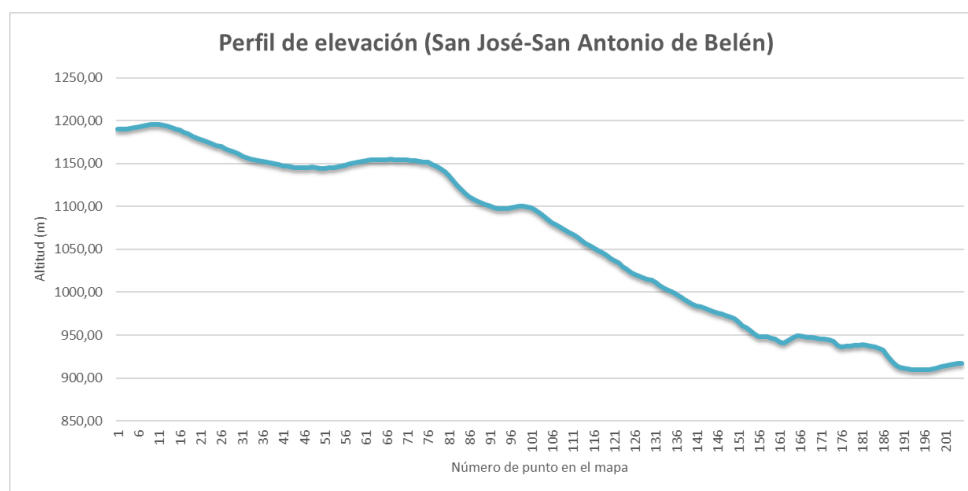


Fig. 22. Perfil de elevación de la ruta San José-San Antonio de Belén. Elaboración propia.

La distancia total de la ruta de San José – Belén es de 17,28 km, para la que se determinaron seis subestaciones con rangos de alimentación de aproximadamente 3 km de la línea. En la siguiente tabla, se muestran los valores calculados para la potencia de cada subestación de esta ruta.

Tabla 24: Potencia máxima por subestación (SJO-BEL). Elaboración propia.

Subestación	Fuerza requerida (N)	Potencia (kW)
S/E1-B	91 650,38	1 018,34
S/E2-B	79 443,70	882,71
S/E3-B	112 466,96	1 249,63
S/E4-B	112 028,99	1 244,77
S/E5-B	85 667,89	951,87
S/E6-B	95 137,95	1 057,09

## San José-Cartago.

Se realizó el mismo proceso que las dos rutas anteriores, obteniendo los perfiles de elevación como se muestra en la Figura 23.

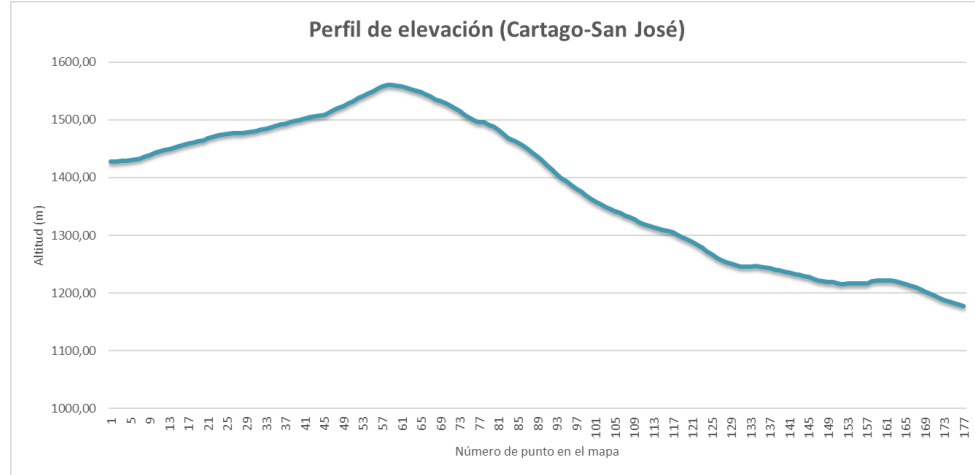


Fig. 23. Perfil de elevación de la ruta Cartago-San José. Elaboración propia.

Por último, esta ruta tiene una distancia de 21,74 km, y para ella se establecieron como referencia siete subestaciones repartidas cada 3 km aproximadamente. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de potencia para cada una de las subestaciones de la línea.

Tabla 25: Potencia máxima por subestación (SJO-CAR). Elaboración propia.

Subestación	Fuerza requerida (N)	Potencia (kW)
S/E1-C	81.230,13	902,56
S/E2-C	92.330,48	1.025,89
S/E3-C	94.922,56	1.054,70
S/E4-C	98.316,84	1.092,41
S/E5-C	89.899,68	998,89
S/E6-C	79.339,64	881,55
S/E7-C	78.355,22	870,61

## Circuito preliminar.

A partir de las potencias determinadas previamente, se estableció una potencia promedio de 900 kW para cada subestación, basada en el estudio de electrificación y catenaria realizado por el INCOFER e IDOM [98].

A continuación se muestra una representación básica de un diagrama eléctrico para los trenes seleccionados.

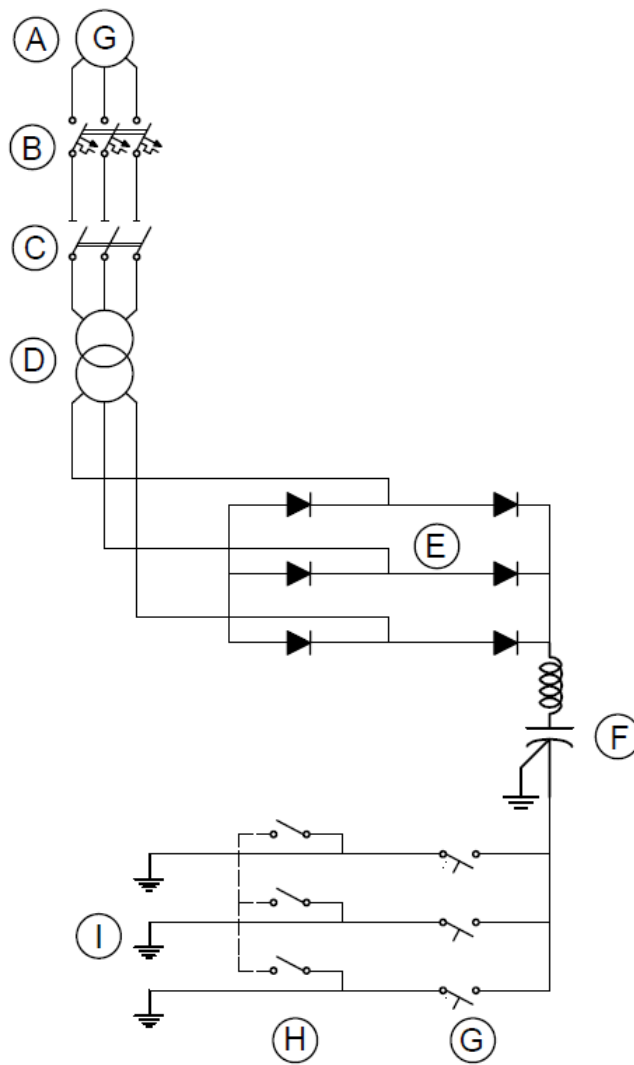


Fig. 24. Diagrama eléctrico general de la instalación preliminar. Elaboración propia mediante AutoCAD.

La descripción de cada uno de los puntos se presenta en los siguientes ítems. Cabe mencionar que, tal y como se indicó anteriormente, un diagrama más completo requeriría más componentes; sin embargo, el diagrama anterior muestra un acercamiento a una subestación para un sistema eléctrico de catenaria para el tren.

- **A:** Entrada de potencia desde la red eléctrica de la compañía suministradora, dependiendo de la zona, ya sea de 13,8 kV o 34,5 kV.
- **B:** Interruptor automático de control de potencia, utilizado para evitar sobrecargas en el sistema y gestionar la administración de potencia.
- **C:** Interruptores de vacío.
- **D:** Transformador de potencia de 900 kW.

- **E:** Puente rectificador de diodos, que convierte la alimentación de la catenaria en corriente continua.
- **F:** Filtros de armónicos.
- **G:** Seccionadores, que permiten aislar las líneas de su fuente de energía cuando se requiere.
- **H:** By-pass, el cual permite evitar el suministro de corriente a la línea cuando no hay un tren en las vías; en caso contrario, se cierra el contacto y permite el flujo de corriente.
- **I:** Sistemas de puesta a tierra para tres líneas: dos de ellas funcionan como alimentación a la catenaria (una de reserva en caso de fallo) y la tercera es el retorno hacia la subestación.

En estos sistemas, también es común utilizar transformadores de potencia auxiliares. Según el *Estudio de Ingeniería de Valor del Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros (TRP) en la Gran Área Metropolitana (GAM)*, en su memoria 17, Electrificación y Catenaria [98], se indica que estos transformadores auxiliares tienen un voltaje secundario de 240/120 V, destinados a los servicios auxiliares. Además, se especifica que los transformadores deben ser de tipo seco, con devanados en material de cobre.

Con respecto al diagrama anterior y al estudio mencionado, los interruptores automáticos de la entrada general de la acometida distribuyen las salidas a los grupos de transformadores. Por otra parte, la rectificación se da por medio de equipos de doble puente trifásico. También, como parte de la alimentación a la línea de catenaria, los seccionadores son manejados mediante interruptores extrarrápidos con sus respectivas protecciones, conectando el polo positivo a la catenaria y el negativo al carril, pasando por todo el sistema de potencia del tren.

### Objetivo 3.

**Desarrollar un análisis de los costos del ciclo de vida útil de los trenes de combustión y los trenes eléctricos ligeros mediante la comparación de sus costos de adquisición, operativos, de mantenimiento y descarte para el establecimiento de un impacto financiero acorde a su ejecución.**

Para el presente capítulo, se determinó un estimado de costos relacionados con el ciclo de vida de los trenes Apolo 2400, los trenes DMU para Costa Rica, y los trenes eléctricos Avenio-Siemens y Urbos-CAF. Con este propósito, se utilizaron diferentes referencias, como datos abiertos del INCOFER, información proporcionada directamente por dicha institución, cálculos aproximados de mantenimiento y operación, y consulta en diferentes instituciones referentes al descarte de los trenes.

Cabe aclarar que, para el análisis del costo del ciclo de vida útil, se consideró un ciclo de vida de veinte años para los trenes. No obstante, no existe una normativa en Costa Rica que indique específicamente la cantidad de años del ciclo de vida para dichos vehículos; por lo tanto, se tomó en cuenta lo estipulado en el *Reglamento de Vida Máxima Autorizada para las Unidades de Transporte Colectivo Remunerado de Personas y Servicios Especiales* [99].

#### DMU Apolo 2400.

A continuación, se estimaron los costos aproximados correspondientes al tren de combustión interna Apolo 2400. Este fue comprado a Feve en el 2009, por lo que el precio en ese momento difiere del actual; por ello, se evaluó un valor actualizado.

#### Costo de adquisición.

Para el desarrollo del análisis del costo del ciclo de vida útil de los trenes, se toma en cuenta una máquina por cada uno de los modelos. En el 2009, el INCOFER realizó la compra de cuatro trenes Apolo 2400, cuyo costo fue de dos millones de euros; sin embargo, dicha compra también incluía parte del mantenimiento durante tres años por parte de la empresa Feve [100].

Tabla 26: Costo de adquisición Apolo 2400 [100].

Modelo	Precio de compra
Apolo 2400	\$ 500 000,00

#### Costos operativos.

Para este modelo, se obtuvieron costos relacionados al consumo de combustible diésel del material rodante de los años 2018, 2019, 2021 y del primer trimestre del 2017 [101] [102] [103] [104]. Para ello, se realizaron proyecciones para un ciclo de vida de 20 años, comenzando en 2017, año en el que se obtuvieron datos sobre la cantidad de litros de combustible. Las proyecciones se extendieron hasta 2036, utilizando un modelo de media móvil por medio del *software* Excel QM.

En el caso del año 2017, al únicamente contar con los costos de los primeros tres meses, también se realizó una media móvil por medio del *software* Excel QM para proyectar el costo del combustible para todos los meses del año a partir de esos tres meses.

Para el año 2020, se realizó un cálculo de media aritmética de los años 2017, 2018, 2019 y 2021 para

evitar un mal resultado. Para 2021, al contar con datos de consumo de combustible, se mantuvo ese resultado, a pesar de ser bajo.

A continuación, se muestra un gráfico con los resultados de la cantidad de litros de diésel por año.

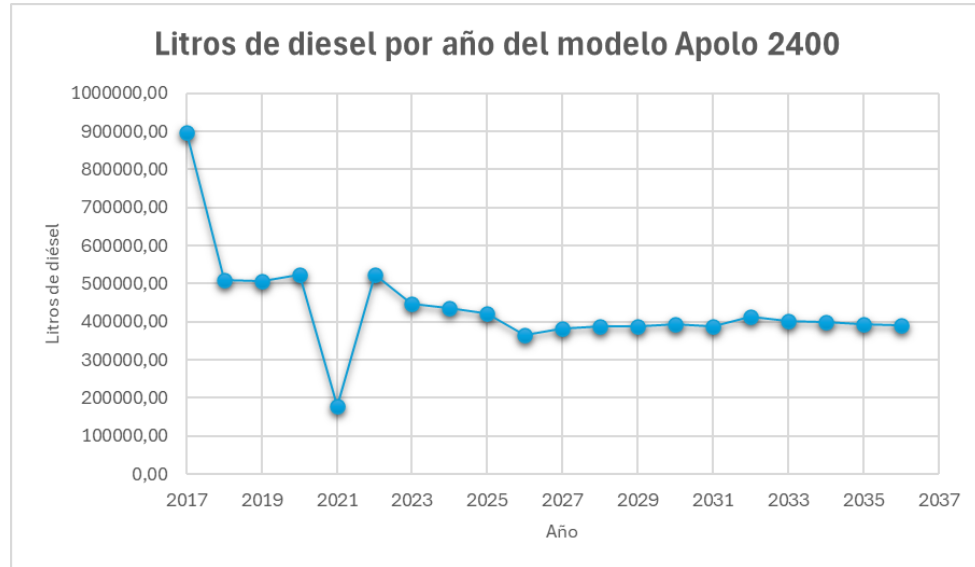


Fig. 25. Litros de diésel por año del modelo Apolo 2400. Elaboración propia.

Seguidamente, se muestran los resultados obtenidos mediante Excel del costo total del consumo de diésel de los trenes Apolo 2400. En este sentido, se realizó el cálculo referente a una unidad en los veinte años de su ciclo de vida.

Tabla 27: Costos operativos por 20 años del modelo Apolo 2400. Elaboración propia.

Modelo	Apolo 2400
Costo promedio por año	₡ 262 561 294,44
Costo total (₡)	₡ 5 251 225 888,89
Costo por unidad (₡)	₡ 291 734 771,61

### Costos de mantenimiento.

Para lo que corresponde a los costos del tren Apolo 2400, se recopilaron valores de varias facturas de 2021 obtenidas por medio del INCOFER. Esto permitió determinar un aproximado en cuanto al mantenimiento correctivo, debido a que dichas facturas corresponden a repuestos y reparaciones del tren.

Aunado a lo anterior, se estimó un aproximado de mantenimiento general [105] basado en un porcentaje de 30% del inventario anual [104] de 2021, el cual fue obtenido del Estado de Situación Financiera del 01 de enero de 2021 al 31 de diciembre de 2021 por parte del INCOFER. Este valor fue de ₡3 876 061 100,12. A ello se le restaron los costos de mantenimiento correctivo calculados previamente. Además, a este monto se le calculó un 34,62%, debido a que, según el inventario total del INCOFER, el 34,62% corresponde a los trenes Apolo 2400 [104], lo cual es calculado con la cantidad de locomotoras y trenes totales de la institución.

Por otra parte, a la suma de los costos de mantenimiento, se le calculó un valor de mantenimiento indirecto de inoperabilidad y de mano de obra respecto a un 20 % del total según lo encontrado en diferentes fuentes [106] [107]. Estos costos de mantenimiento se resumen en la siguiente tabla correspondiente al año 2021, en la que se determina el costo aproximado por unidad.

Tabla 28: Costos de mantenimiento del modelo Apolo 2400 del año 2021. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>
Mantenimiento correctivo	₡ 108 900 159,13
Mantenimiento adicional estimado	₡ 235 526 630,23
Costo de mano de obra aproximado	₡ 68 885 357,87
Costo aprox. De inoperabilidad	₡ 95 681 762,08
Costo total mantenimiento (2021)	₡ 508 993 909,31
<b>Costo total por unidad</b>	<b>₡ 28 277 439,41</b>

Seguidamente, se realizó un aproximado de los años anteriores y posteriores al 2021, para proyectar un ciclo de vida de veinte años. Para ello, se tomó en cuenta un 3 % de inflación y un 4 % de deterioro del equipo [108] [109]. Estos valores se muestran a continuación, así como el costo total de los veinte años.

Tabla 29: Costos de mantenimiento del modelo Apolo 2400 en su ciclo de vida de 20 años. Elaboración propia.

<b>Año</b>	<b>Costo</b>
2017	₡ 21 152 995,39
2018	₡ 22 745 156,33
2019	₡ 24 457 157,34
2020	₡ 26 298 018,65
2021	₡ 28 277 439,41
2022	₡ 30 256 860,16
2023	₡ 32 374 840,38
2024	₡ 34 641 079,20
2025	₡ 37 065 954,75
2026	₡ 39 660 571,58
2027	₡ 42 436 811,59
2028	₡ 45 407 388,40
2029	₡ 48 585 905,59
2030	₡ 51 986 918,98
2031	₡ 55 626 003,31
2032	₡ 59 519 823,54
2033	₡ 63 686 211,19
2034	₡ 68 144 245,97
2035	₡ 72 914 343,19
2036	₡ 78 018 347,21
<b>Total</b>	<b>₡ 883 256 072,15</b>

### Costos de descarte.

Según la *Valoración, Renovación, Depreciación de la Propiedad, Planta y Equipo de la Contabilidad Nacional* [110], el porcentaje de depreciación de un ferrocarril es de 5 %, y para una locomotora es de 4 %. Además, la vida útil recomendada para un ferrocarril es de veinte años; mientras que para una locomotora

es de veinticinco años. El tren Apolo, como se mencionó anteriormente, tiene aproximadamente cuarenta años desde su fabricación. Se trata de un modelo antiguo que, para mejorar su vida útil, requiere una inversión considerable, la cual difícilmente puede ser recuperada.

Por otra parte, en cuanto a su reciclaje, no se conocen todos los materiales de los que están hechos estos modelos; sin embargo, puede ser recomendable optar por un reciclaje en su descarte. Los trenes de pasajeros son más difíciles de reciclar debido a su material variable, a diferencia de los materiales de un tren de carga, que está mayormente hecho de acero e hierro fundido, los cuales se puede reciclar hasta en un 60 % o un 80 % [111], por lo que el porcentaje del reciclaje del Apolo 2400 podría ser menor.

Para determinar un valor aproximado del material rodante, se evaluó con respecto a un 6 % de depreciación anual [112], ya que es un valor de porcentaje máximo para estos sistemas; esto al ser un tren con una vida útil de cerca de cuarenta años. Dicho valor de rescate del tren se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 30: Valor final del ciclo de vida respecto al porcentaje de depreciación. Elaboración propia.

Número de año	Valor inicial	Valor de depreciación
1	\$ 500 000,00	\$ 470 000,00
2	\$ 470 000,00	\$ 441 800,00
3	\$ 441 800,00	\$ 415 292,00
4	\$ 415 292,00	\$ 390 374,48
5	\$ 390 374,48	\$ 366 952,01
6	\$ 366 952,01	\$ 344 934,89
7	\$ 344 934,89	\$ 324 238,80
8	\$ 324 238,80	\$ 304 784,47
9	\$ 304 784,47	\$ 286 497,40
10	\$ 286 497,40	\$ 269 307,56
11	\$ 269 307,56	\$ 253 149,10
12	\$ 253 149,10	\$ 237 960,16
13	\$ 237 960,16	\$ 223 682,55
14	\$ 223 682,55	\$ 210 261,60
15	\$ 210 261,60	\$ 197 645,90
16	\$ 197 645,90	\$ 185 787,15
17	\$ 185 787,15	\$ 174 639,92
18	\$ 174 639,92	\$ 164 161,52
19	\$ 164 161,52	\$ 154 311,83
20	\$ 154 311,83	\$ 145 053,12
<b>Valor final del ciclo de vida (C)</b>	<b>C 75 205 691,42</b>	

### Costo de ciclo de vida útil Apolo 2400.

En el caso del modelo Apolo 2400, el costo del ciclo de vida es considerablemente inferior, ya que se toma en cuenta un valor de adquisición bajo, correspondiente al precio de compra de los trenes luego de un largo periodo de uso. Dado que se desconoce el valor original de adquisición, esto influye significativamente en el cálculo; sin embargo, se proporciona una estimación aproximada del costo del ciclo de vida de estos trenes. En la Tabla 31, se muestran los valores del costo del ciclo de vida del Apolo 2400 con su respectivo TCO.

Tabla 31: Costo del ciclo de vida para los trenes Apolo 2400. Elaboración propia.

Descripción	Costo (C)	Costo (\$)
<b>Adquisición</b>	C 259 235 000,00	\$ 500 000,00
<b>Operación</b>	C 291 734 771,61	\$ 562 684,00
<b>Mantenimiento</b>	C 883 256 072,15	\$ 1 703 581,83
<b>Costo de descarte</b>	C 75 205 691,42	\$ 145 053,12
<b>Sumatoria</b>	C 1 174 990 843,75	\$ 2 266 265,83
<b>Valor futuro</b>	C 5 799 700 928,70	\$ 11 186 184,21
<b>TCO</b>	C 1 359 020 152,33	\$ 2 621 212,71
<b>CCV</b>	C 275 330 789,48	\$ 531 044,78

## DMU para Costa Rica.

Para el estudio de los costos del ciclo de vida del DMU para Costa Rica, se realiza una estimación detallada. No obstante, los resultados son más precisos, debido a que el tren ha estado en operación en el país tan solo durante cuatro años desde su adquisición. Además, se debe tener presente que el costo de compra incluyó un acuerdo que cubría tres años de mantenimiento, capacitación y repuestos por parte de la compañía CRRC. Sin embargo, esta garantía expiró en julio de 2024, por lo que los costos de mantenimiento se estimaron a través de cálculos aproximados.

### Costo de adquisición.

Según la información recopilada de La Prensa Libre, en 2018 se compraron los ocho primeros trenes a la compañía CRRC. El precio total de estas unidades fue de US\$32.6 millones de dólares, lo cual incluía, como se mencionó anteriormente, una garantía de tres años [113]. El costo de adquisición de un solo tren se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32: Costo de adquisición modelo DMU para Costa Rica 3100 [113].

Modelo	Precio de compra
DMU para Costa Rica	\$ 4 075 000,00

### Costos operativos.

En cuanto a los costos operativos para este modelo, estos fueron obtenidos por medio del INCOFER, quien facilitó la información donde se indican los litros de combustible, aceites, lubricantes, etc. Primeramente, se evaluó la cantidad de litros de combustible consumidos al año, con su respectivo precio. Este valor se multiplicó por los veinte años del ciclo de vida, con una tasa de inflación del 3%. A partir de ese resultado, y con un total de 16 trenes que se tienen de este modelo, se obtuvo el resultado del precio de combustible en el ciclo de vida por unidad. El consumo anual, así como el total durante los veinte años, corresponde al consumo de todas las unidades de DMU actualmente en servicio en Costa Rica.

Tabla 33: Costo de combustible del modelo DMU para Costa Rica 3100. Elaboración propia.

Descripción	Litros	Costo
Consumo por año	912 912	C 446 669 583,36
Consumo 20 años	18 258 240	C 12 002 178 977,72
Consumo por unidad	1 141 140	C 750 136 186,11

Seguidamente, estos trenes consumen, además de combustible, urea, de la marca AdBlue, la cual representa un costo en cuanto a la operación del tren. Estos costos se sistematizan en la siguiente tabla.

Tabla 34: Costo de AdBlue del modelo DMU para Costa Rica 3100. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Litros</b>	<b>Costo</b>
Consumo por año	36 516,48	₡ 26 399 443,15
Consumo 20 años	730 329,60	₡ 709 362 923,74
Consumo por unidad	45 645,60	₡ 44 335 182,73

Finalmente, se recopilamos los costos totales de operación en la siguiente tabla, en la que se muestran los resultados obtenidos al sumar el costo anual total por unidad de combustible y AdBlue.

Tabla 35: Costos totales de operación del modelo DMU para Costa Rica 3100. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
Consumo combustible	₡ 750 136 186,11
Consumo AdBlue	₡ 44 335 182,73
<b>Total</b>	<b>₡ 794 471 368,84</b>

#### **Costos de mantenimiento.**

En cuanto a los costos de mantenimiento de los DMU para Costa Rica, se realizó un análisis basado en la información proporcionada por INCOFER, que incluía los costos de los aceites, filtros y otros artículos relacionados con el mantenimiento preventivo. A partir de estos datos, se elaboró un resumen de los costos de mantenimiento preventivo, que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 36: Resumen de los costos anuales de mantenimiento preventivo del tren DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
Mantenimiento aceites	₡ 27 930 260,94
Mantenimiento accesorios	₡ 109 622 698,03
<b>Sumatoria anual</b>	<b>₡ 137 552 958,97</b>

Posteriormente, para estimar los costos totales de mantenimiento, se calculó un costo adicional basado en un 30 % del valor del inventario del INCOFER, que asciende a ₡3.876.061.100,12 según el Informe Anual de 2021. A este valor, se le aplicó el porcentaje correspondiente a los trenes DMU para Costa Rica en relación con el total de unidades férreas de la institución. Al resultado obtenido, se le restaron los costos de mantenimiento preventivo antes indicados.

Por otro lado, se estimó un costo de inoperabilidad en función del porcentaje de disponibilidad, el cual fue del 72,22 % en 2021 [104]. Finalmente, sumando el costo de mantenimiento preventivo, el costo de mantenimiento adicional y el costo de inoperabilidad, se calculó el costo de mano de obra, que representa un 20 % de este total.

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de todos estos valores y la suma de ellos, para obtener el costo estimado de los veinte años por unidad.

Tabla 37: Resumen de los costos de mantenimiento por unidad del tren DMU para Costa Rica.  
Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
Mantenimiento preventivo	₡ 137 552 958,97
Mantenimiento adicional estimado	₡ 162 105 324,68
Costo aprox. De inoperabilidad	₡ 83 245 071,20
Costo mano de obra (20 %)	₡ 59 931 656,73
Sumatoria anual	₡ 442 835 011,58
Costos por unidad anual	₡ 27 677 188,22
<b>Costos por unidad a 20 años</b>	<b>₡ 1 134 639 957,30</b>

### Costos de descarte.

Ya que este modelo aún se encuentra dentro de los veinte años recomendados como ciclo de vida útil, se consideró un porcentaje de depreciación de 5% según lo establecido por la *Valoración, Renovación, Depreciación de la Propiedad, Planta y Equipo de la Contabilidad Nacional* [110]. Esta cifra hace referencia al porcentaje establecido de depreciación de un ferrocarril, tomando en cuenta todo el equipo de potencia y sus vagones.

Este costo de depreciación se tomó en cuenta con respecto al valor de adquisición del tren DMU para Costa Rica, el cual se calculó para 20 años.

Tabla 38: Costo de descarte del tren DMU para Costa Rica 3100. Elaboración propia.

<b>Número de año</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Valor de depreciación</b>
1	₡ 4 075 000,00	₡ 3 871 250,00
2	₡ 3 871 250,00	₡ 3 677 687,50
3	₡ 3 677 687,50	₡ 3 493 803,13
4	₡ 3 493 803,13	₡ 3 319 112,97
5	₡ 3 319 112,97	₡ 3 153 157,32
6	₡ 3 153 157,32	₡ 2 995 499,45
7	₡ 2 995 499,45	₡ 2 845 724,48
8	₡ 2 845 724,48	₡ 2 703 438,26
9	₡ 2 703 438,26	₡ 2 568 266,34
10	₡ 2 568 266,34	₡ 2 439 853,03
11	₡ 2 439 853,03	₡ 2 317 860,38
12	₡ 2 317 860,38	₡ 2 201 967,36
13	₡ 2 201 967,36	₡ 2 091 868,99
14	₡ 2 091 868,99	₡ 1 987 275,54
15	₡ 1 987 275,54	₡ 1 887 911,76
16	₡ 1 887 911,76	₡ 1 793 516,17
17	₡ 1 793 516,17	₡ 1 703 840,37
18	₡ 1 703 840,37	₡ 1 618 648,35
19	₡ 1 618 648,35	₡ 1 537 715,93
20	₡ 1 537 715,93	₡ 1 460 830,13
<b>Valor final del ciclo de vida (₡)</b>		<b>₡757 396 599,48</b>

### Costo de ciclo de vida útil DMU para Costa Rica 3100.

El resultado del costo del ciclo de vida se presenta en la siguiente tabla, con los respectivos valores en colones y dólares. El cálculo incluye la suma de los costos operativos y de mantenimiento, un valor futuro con respecto a dicha suma y a una tasa de descuento del 8,31 %, según lo establecido por MIDEPLAN [114], así como el TCO.

Tabla 39: Costo de ciclo de vida útil del modelo DMU para Costa Rica 3100. Elaboración propia.

Descripción	Costo (C)	Costo (\$)
Adquisición	C 2 112 765 250,00	\$ 4 075 000,00
Operación	C 794 471 368,84	\$ 1 532 338,17
Mantenimiento	C 1 134 639 957,30	\$ 2 188 438,98
Costo de descarte	C 757 396 599,48	\$ 1 460 830,13
Sumatoria	C 1 929 111 326,14	\$ 3 720 777,14
Valor futuro	C 9 522 005 051,57	\$ 18 365 585,38
TCO	C 3 284 479 976,66	\$ 6 334 947,01
CCV	C 665 419 466,71	\$ 1 283 429,06

### Trenes eléctricos.

Para evaluar el costo del ciclo de vida de los trenes eléctricos seleccionados, el Avenio-Siemens y el Urbos-CAF, se realizó el mismo procedimiento que los trenes anteriores. Sin embargo, se incluyeron cálculos más teóricos para dar un aproximado a lo que podrían ser sus respectivos costos.

#### Costo de adquisición.

Para el caso del modelo Avenio-Siemens, se escogió el costo que tuvo en la ciudad de Copenhague, con un estimado de €4 millones según información solicitada a la institución encargada en dicha ciudad. Por otra parte, para el modelo Urbos, se consideró el valor referente a los Urbos Tram comprados para la ciudad de Marsella en 2022 [115].

Tabla 40: Costos de adquisición para los dos modelos de trenes eléctricos seleccionados.

Modelo	Precio de compra
Avenio-Siemens	\$ 4 379 120,00
Urbos-CAF	\$ 4 160 810,00

#### Costos operativos.

En lo que se refiere a los costos de operación, se asumió que los trenes tendrían las mismas rutas que siguen los DMU para Costa Rica, para lo cual se utilizó la información brindada por parte del INCOFER, que incluye el número de viajes y los kilómetros que se recorren. En la siguiente tabla, se muestran los cálculos realizados mediante Excel para obtener el valor de los kilómetros recorridos al año. De este modo, se incluyen los kilómetros totales de cada una de las tres rutas y el número de viajes diarios; con ello, se multiplican esos valores para obtener un total de kilómetros al día para cada ruta y eventualmente sumarlos.

Tabla 41: Kilómetros recorridos por día del DMU para Costa Rica. Elaboración propia a partir de información brindada por el Incofer.

Ruta	km	Número de viajes al día	Total km al día
SJO-BEL-SJO	29,2	7	204,4
SJO-ALA-SJO	42	13	546
SJO-CAR-SJO	42	10	420
<b>Total</b>			<b>1 170,4</b>

El valor total obtenido se multiplicó por cinco días de la semana en que se realizan las rutas, y, posteriormente, se multiplicó también por 52 semanas del año, para obtener un total de kilómetros al año recorridos en las tres rutas del tren de pasajeros que existe en la actualidad.

Tabla 42: Kilómetros por año del DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Total
Km/día	1 170,4
km/sem	5 852
km/año	304 304

Como paso siguiente, se procedió a realizar el cálculo del consumo de cada uno de los modelos del tren eléctrico. Primeramente, para el modelo Avenio se tienen los siguientes consumos aproximados.

- **optimum scenario:**

- 5 % retention of time
- 217 persons (69 seats, 4 p/m<sup>2</sup> standing)
- 100 % brake energy recovery
- 100,000 km annual mileage

energy consumption: 3.05 kWh/km

- **average scenario:**

- 5 % retention of time
- 164 persons (DIN EN 15663: 80 % seat occupancy and 3 p/m<sup>2</sup>)
- 50 % brake energy recovery
- 90,000 km annual mileage

energy consumption: 3.87 kWh/km

- **customer scenario:**

- 9 % retention of time
- 43 persons (20 % passenger load)
- 30 % brake energy recovery
- 80,000 km annual mileage

energy consumption: 4.23 kWh/km

Fig. 26. Consumos energéticos aproximados del modelo Avenio-Siemens. [116].

Con respecto a la Figura 26, se determinó un valor medio de 3,87 kWh/km, lo que permitió calcular el consumo anual en kWh. A partir de las tarifas vigentes del ICE para 2024, se consideró un costo de ₡73,07 por kWh consumido [117]. Con esta información, se determinó el costo anual de los trenes Avenio. Dado que los kilómetros recorridos anualmente se basan en los viajes realizados por los 16 trenes DMU para Costa Rica, se asumió que los trenes Avenio también serían 16. Por lo tanto, para calcular el costo de consumo eléctrico de los Avenio, se dividió el valor total entre 16.

Tabla 43: Consumo energético preliminar para el modelo Avenio-Siemens. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Consumo kWh/km	3,87
Consumo anual (kWh)	1 177 656,48
Costo anual	₡ 86 051 358,99
<b>Costo anual por unidad</b>	<b>₡ 5 378 209,94</b>

Por otro lado, se siguió el mismo procedimiento para el modelo Urbos. Sin embargo, en este caso, se consideran dos tipos de consumo: uno correspondiente al servicio activo y otro que incluye tanto el servicio como el consumo en modo de espera o "standby". Por lo tanto, se eligió el consumo combinado del servicio y el modo "standby". Sin embargo, también se incluyen consumos donde el tren tiene 0% y 100% de recuperación de energía. Para ello, se calculó un promedio entre ambos valores para determinar el consumo. Estos valores se expresaron en kWh/pass.km, lo que equivale a un consumo por pasajero. Se determinó una cantidad promedio de 164 pasajeros, tomada como referencia lo que se observa en la Figura 27 del tren Urbos, con el fin de obtener el consumo en kWh/km. A continuación, se muestran los valores de los consumos mencionados.

kW.h/pass.km		
<b>Manufacturing</b>	<b>1,79 E-04</b>	
	<b>0% receptivity</b>	<b>100% receptivity</b>
<b>Average use: service</b>	<b>0.04626</b>	<b>0.02598</b>
<b>Average use: service + standby</b>	<b>0.04691</b>	<b>0.02663</b>

Fig. 27. Consumos energéticos aproximados del modelo Urbos-CAF. [63].

Después de obtener este promedio, se calcularon los costos anuales por unidad de Urbos. En este punto, se evidenció un consumo mayor de este modelo en comparación al Avenio, por lo que su eficiencia energética es menor.

Tabla 44: Consumo energético preliminar para el modelo Urbos-CAF. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Consumo kWh/pass.km	0,03677
Consumo kWh/km	6,03028
Consumo anual (kWh)	1835038,33
Costo anual	₡ 134 086 250,42
<b>Costo anual por unidad</b>	<b>₡ 8 380 390,65</b>

Finalmente, se realizó un aproximado de los costos operativos a partir de su consumo energético, para un ciclo de vida de veinte años. Para ello, se aplicó un crecimiento del 1% aproximado a la tarifa energética, según lo estipulado en el *Plan de Expansión de la Generación Eléctrica del ICE* [118].

Tabla 45: Consumo energético preliminar en 20 años de los modelos Avenio-Siemens y Urbos-CAF. Elaboración propia.

<b>Año</b>	<b>Precio kWh</b>	<b>Avenio</b>	<b>Urbos</b>
1	¢ 73,07	¢ 5 378 209,94	¢ 8 380 390,65
2	¢ 73,80	¢ 5 431 992,04	¢ 8 464 194,56
3	¢ 74,54	¢ 5 486 311,96	¢ 8 548 836,50
4	¢ 75,28	¢ 5 541 175,08	¢ 8 634 324,87
5	¢ 76,04	¢ 5 596 586,83	¢ 8 720 668,12
6	¢ 76,80	¢ 5 652 552,70	¢ 8 807 874,80
7	¢ 77,57	¢ 5 709 078,22	¢ 8 895 953,55
8	¢ 78,34	¢ 5 766 169,00	¢ 8 984 913,08
9	¢ 79,12	¢ 5 823 830,69	¢ 9 074 762,21
10	¢ 79,92	¢ 5 882 069,00	¢ 9 165 509,83
11	¢ 80,71	¢ 5 940 889,69	¢ 9 257 164,93
12	¢ 81,52	¢ 6 000 298,59	¢ 9 349 736,58
13	¢ 82,34	¢ 6 060 301,57	¢ 9 443 233,95
14	¢ 83,16	¢ 6 120 904,59	¢ 9 537 666,29
15	¢ 83,99	¢ 6 182 113,64	¢ 9 633 042,95
16	¢ 84,83	¢ 6 243 934,77	¢ 9 729 373,38
17	¢ 85,68	¢ 6 306 374,12	¢ 9 826 667,11
18	¢ 86,54	¢ 6 369 437,86	¢ 9 924 933,78
19	¢ 87,40	¢ 6 433 132,24	¢ 10 024 183,12
20	¢ 88,28	¢ 6 497 463,56	¢ 10 124 424,95
<b>Total</b>		<b>¢ 118 422 826,09</b>	<b>¢ 184 527 855,22</b>

### Costos de mantenimiento.

El costo de mantenimiento de los trenes se calculó de manera general, basándose en un aproximado de los costos estimados en el Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros (TRP) de 2018 [91], en donde se realizaron estudios de un eventual plan de mantenimiento en el que se contemplaban futuros escenarios. De este modo, se utilizó la información proporcionada en dicho estudio realizado por IDOM, como los costos operativos (OPEX), donde se muestran costos relacionados, como la mano de obra para el mantenimiento del material rodante en diferentes departamentos; y los costos de los fungibles necesarios, como el suministro de materiales, repuestos, entre otros.

Con estos datos, fue posible obtener el costo de mantenimiento por kilómetro. Para ello, se consideró el servicio que se estipulaba en el estudio mencionado anteriormente de IDOM. A continuación, se muestran los kilómetros totales de dicho estudio por año.

		km/trayecto	Trayectos/día	días/año	km/año	
Línea 1	Día laborable	27,4	266	256	1.865.830,4	2.325.766,8
	Día no laborable	27,4	154	109	459.936,4	
Línea 2	Día laborable	21,6	266	256	1.470.873,6	1.833.451,2
	Día no laborable	21,6	154	109	362.577,6	
Línea 3	Día laborable	25,4	266	256	1.729.638,4	2.156.002,8
	Día no laborable	25,4	154	109	426.364,4	
Línea 4	Día laborable	7,8	134	256	267.571,2	335.587,2
	Día no laborable	7,8	80	109	68.016,0	
Línea 5	Día laborable	2,7	134	256	92.620,8	116.164,8
	Día no laborable	2,7	80	109	23.544,0	
					Servicio km/año	6.766.972,8
					+10% km/año	676.697,3
					<b>Total km/año</b>	<b>7.443.670,1</b>

Fig. 28. Kilómetros por año estimados en el estudio del Tren Rápido de Pasajeros del GAM. [91].

Los datos anteriores constituyeron el punto de partida para calcular el costo de mantenimiento del material rodante estipulado en el estudio mencionado. Posteriormente, se obtuvo el costo por kilómetro, considerando que se había proyectado un total de 78 unidades de material rodante.

Tabla 46: Costo total de mantenimiento por unidad del estudio realizado por IDOM en el 2018.

Descripción	Costo
Personal de mantenimiento de material rodante	\$ 4 389 779,00
Costo de fungibles de mantenimiento de material rodante	\$ 3 603 981,00
Total (\$)	\$ 7 993 760,00
Total (€)	€ 4 127 897 726,40
<b>Total por unidad</b>	<b>€ 52 921 765,72</b>

El costo total en colones de la tabla anterior se dividió entre los kilómetros por año mostrados en la Figura 28, con el fin de obtener un costo por kilómetro. Con este último valor, se calculó el costo total de mantenimiento basándose en el servicio que existe actualmente donde opera el DMU para Costa Rica, cuyo costo se conocía previamente.

Tabla 47: Costo total de mantenimiento por unidad de tren eléctrico ligero considerando un servicio de 16 unidades en las rutas actuales del 2024. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Costo total de mantenimiento (IDOM)	€ 4 127 897 726,40
Servicio IDOM (km/año)	7 443 670,1
Costo por kilómetro	€ 554,55
Servicio actual (km/año)	304 304
Total (actualidad)	€ 168 752 211,32
<b>Total por unidad (actualidad)</b>	<b>€ 10 547 013,21</b>

Seguidamente, se realizó una aproximación para los costos de mantenimiento por unidad en un plazo de veinte años considerando una inflación del 3% y un 4% de deterioro del material rodante.

Tabla 48: Costo total de mantenimiento por unidad de tren eléctrico ligero en un plazo de 20 años.  
Elaboración propia.

Número de año	Costo
1	€ 10 547 013,21
2	€ 11 285 304,13
3	€ 12 075 275,42
4	€ 12 920 544,70
5	€ 13 824 982,83
6	€ 14 792 731,63
7	€ 15 828 222,84
8	€ 16 936 198,44
9	€ 18 121 732,33
10	€ 19 390 253,60
11	€ 20 747 571,35
12	€ 22 199 901,34
13	€ 23 753 894,44
14	€ 25 416 667,05
15	€ 27 195 833,74
16	€ 29 099 542,10
17	€ 31 136 510,05
18	€ 33 316 065,75
19	€ 35 648 190,35
20	€ 38 143 563,68
<b>Total</b>	<b>€ 432 379 998,97</b>

#### Costos de descarte.

Como parte del análisis del costo del ciclo de vida útil, se calculó el valor de descarte de los dos modelos eléctricos, utilizando los mismos porcentajes de depreciación establecidos en la *Valoración, Renovación y Depreciación de la Propiedad, Planta y Equipo de la Contabilidad Pública* [110]. Para este cálculo, se tomó en cuenta un porcentaje de depreciación del 5%.

Primeramente, se muestran los valores de depreciación con su valor de descarte a los veinte años para el tren Avenio-Siemens.

Tabla 49: Costo de descarte del modelo Avenio-Siemens. Elaboración propia.

<b>Número de año</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Valor de depreciación</b>
1	\$ 4 379 120,00	\$ 4 160 164,00
2	\$ 4 160 164,00	\$ 3 952 155,80
3	\$ 3 952 155,80	\$ 3 754 548,01
4	\$ 3 754 548,01	\$ 3 566 820,61
5	\$ 3 566 820,61	\$ 3 388 479,58
6	\$ 3 388 479,58	\$ 3 219 055,60
7	\$ 3 219 055,60	\$ 3 058 102,82
8	\$ 3 058 102,82	\$ 2 905 197,68
9	\$ 2 905 197,68	\$ 2 759 937,80
10	\$ 2 759 937,80	\$ 2 621 940,91
11	\$ 2 621 940,91	\$ 2 490 843,86
12	\$ 2 490 843,86	\$ 2 366 301,67
13	\$ 2 366 301,67	\$ 2 247 986,58
14	\$ 2 247 986,58	\$ 2 135 587,25
15	\$ 2 135 587,25	\$ 2 028 807,89
16	\$ 2 028 807,89	\$ 1 927 367,50
17	\$ 1 927 367,50	\$ 1 830 999,12
18	\$ 1 830 999,12	\$ 1 739 449,17
19	\$ 1 739 449,17	\$ 1 652 476,71
20	\$ 1 652 476,71	\$ 1 569 852,87
<b>Valor final del ciclo de vida (C)</b>		<b>C 813 921 618,82</b>

De igual manera, se muestra la tabla con los valores de descarte del modelo Urbos-CAF para el ciclo de vida de veinte años.

Tabla 50: Costo de descarte del modelo Urbos-CAF. Elaboración propia.

Número de año	Valor inicial	Valor de depreciación
1	\$ 4 160 810,00	\$ 3 952 769,50
2	\$ 3 952 769,50	\$ 3 755 131,03
3	\$ 3 755 131,03	\$ 3 567 374,47
4	\$ 3 567 374,47	\$ 3 389 005,75
5	\$ 3 389 005,75	\$ 3 219 555,46
6	\$ 3 219 555,46	\$ 3 058 577,69
7	\$ 3 058 577,69	\$ 2 905 648,80
8	\$ 2 905 648,80	\$ 2 760 366,36
9	\$ 2 760 366,36	\$ 2 622 348,05
10	\$ 2 622 348,05	\$ 2 491 230,64
11	\$ 2 491 230,64	\$ 2 366 669,11
12	\$ 2 366 669,11	\$ 2 248 335,66
13	\$ 2 248 335,66	\$ 2 135 918,87
14	\$ 2 135 918,87	\$ 2 029 122,93
15	\$ 2 029 122,93	\$ 1 927 666,78
16	\$ 1 927 666,78	\$ 1 831 283,44
17	\$ 1 831 283,44	\$ 1 739 719,27
18	\$ 1 739 719,27	\$ 1 652 733,31
19	\$ 1 652 733,31	\$ 1 570 096,64
20	\$ 1 570 096,64	\$ 1 491 591,81
<b>Valor final del ciclo de vida (€)</b>		<b>€ 773 345 606,15</b>

Como parte del valor de descarte, aunque no se consideró en el desarrollo del objetivo, cabe mencionar que ambos modelos cuentan con altos porcentajes de reciclaje en caso de que este fuera el método de disposición, gracias a los documentos de *Declaración Ambiental de Producto* (EPD). Al final del ciclo de vida del tren Avenio, se tiene un porcentaje de reciclaje basado en los materiales del modelo, el cual se detalla en la sección sobre el impacto ambiental.

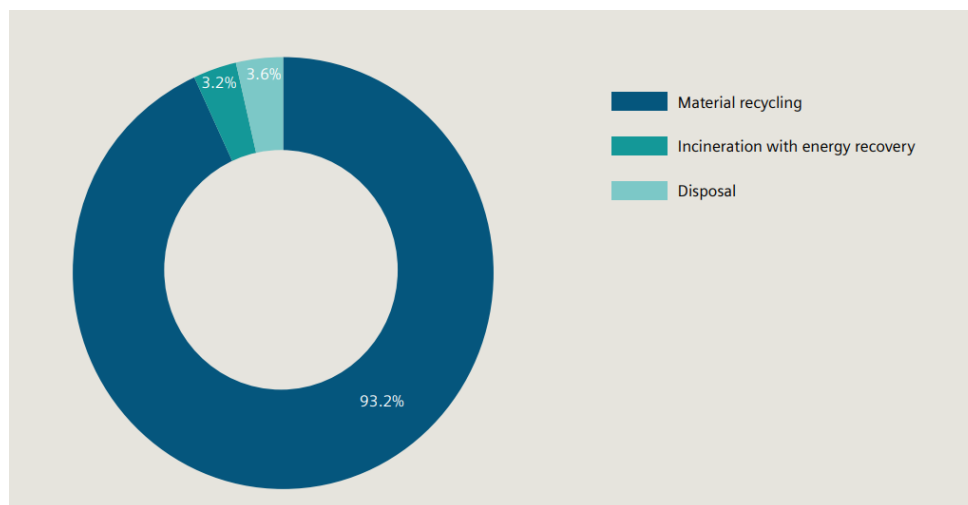


Fig. 29. Porcentaje de reciclaje del modelo Avenio-Siemens. [116].

En cuanto al modelo Urbos, se tienen los siguientes porcentajes de reciclaje y de recuperación de los materiales del tren.

<b>Recyclability Rate</b>	<b>92.70%</b>
<b>Recoverability Rate</b>	<b>94.66%</b>

Recoverability and recyclability potential according to ISO 21106

Fig. 30. Porcentaje de reciclaje del modelo Urbos-CAF. [63].

### Costo de ciclo de vida útil Avenio-Siemens.

A partir de los cálculos y análisis anteriormente expuestos para el modelo Avenio, se obtuvo el resultado que se muestra en la siguiente tabla, donde se sistematizan los costos totales de su ciclo de vida de veinte años y el cálculo del costo de ciclo de vida. Estos valores fueron calculados incluyendo una tasa de descuento de 8,31 % [114].

Tabla 51: Costo del ciclo de vida de 20 años del modelo Avenio-Siemens. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Costo (C)</b>	<b>Costo (\$)</b>
<b>Adquisición</b>	C 2 270 442 346,40	\$ 4 379 120,00
<b>Operación</b>	C 118 422 826,09	\$ 228 408,25
<b>Mantenimiento</b>	C 432 379 998,97	\$ 833 953,75
<b>Costo de descarte</b>	C 813 921 618,82	\$ 1 569 852,87
<b>Sumatoria</b>	C 550 802 825,06	\$ 1 062 362,00
<b>Valor futuro</b>	C 2 718 737 488,89	\$ 5 243 770,11
<b>TCO</b>	C 2 007 323 552,63	\$ 3 871 629,13
<b>CCV</b>	C 406 673 865,39	\$ 784 372,99

### Costo de ciclo de vida útil Urbos-CAF.

De igual manera, para el costo del ciclo de vida del modelo Urbos-CAF, se realizaron los cálculos correspondientes utilizando los valores presentados en la sección anterior. Esto permitió obtener el valor final del costo del ciclo de vida a lo largo de veinte años, con sus respectivos costos totales de propiedad (TCO).

Tabla 52: Costo del ciclo de vida de 20 años del modelo Urbos-CAF. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Costo (C)</b>	<b>Costo (\$)</b>
<b>Adquisición</b>	C 2 157 255 160,70	\$ 4 160 810,00
<b>Operación</b>	C 184 527 855,22	\$ 355 908,45
<b>Mantenimiento</b>	C 432 379 998,97	\$ 833 953,75
<b>Costo de descarte</b>	C 773 345 606,15	\$ 1 491 591,81
<b>Sumatoria</b>	C 616 907 854,19	\$ 1 189 862,20
<b>Valor futuro</b>	C 3 045 028 881,63	\$ 5 873 105,26
<b>TCO</b>	C 2 000 817 408,74	\$ 3 859 080,39
<b>CCV</b>	C 405 355 752,68	\$ 781 830,68

## Análisis del costo del ciclo de vida (ACCV).

Para efectuar este análisis, se dividió en tres secciones: en la primera, se comparan los DMU para Costa Rica con el Avenio-Siemens; en la segunda, se comparan los DMU para Costa Rica con el Urbos-CAF; y en la tercera, se comparan los costos de mantenimiento y operación únicamente de los trenes Apolo 2400 con respecto a los trenes eléctricos. Esto último se realizó debido a que el costo de adquisición de los Apolo 2400 se basa en el precio de compra de 2009, y no en su precio original. Además, estos trenes actualmente se encuentran fuera del rango recomendado en cuanto a ciclo de vida.

### DMU para Costa Rica-Avenio.

En el análisis comparativo entre estos dos trenes, se muestra un costo mayor para el DMU para Costa Rica en su ciclo de vida a veinte años. En la siguiente tabla, se muestra el contraste entre el tren eléctrico Avenio-Siemens y el tren DMU para Costa Rica. Se incluye un costo total de propiedad (TCO) mucho mayor para el caso del tren de combustión en comparación con el eléctrico Avenio. La diferencia fue de más de mil millones de colones en su totalidad de costos en los veinte años.

De igual manera, en cuanto al costo del ciclo de vida (CCV), con la tasa de descuento del 8,31 % establecida por MIDEPLAN [114], dio como resultado un mayor CCV para el DMU comparado con el Avenio, por lo que el segundo se puede considerar como la mejor opción.

Tabla 53: Comparación entre los costos del ciclo de vida del Avenio contra el DMU para Costa Rica.  
Elaboración propia.

Descripción	Avenio-Siemens	DMU para Costa Rica
Adquisición	¢ 2 270 442 346,40	¢ 2 112 765 250,00
Operación	¢ 118 422 826,09	¢ 794 471 368,84
Mantenimiento	¢ 432 379 998,97	¢ 1 134 639 957,30
Costo de descarte	¢ 813 921 618,82	¢ 757 396 599,48
Sumatoria	¢ 550 802 825,06	¢ 1 929 111 326,14
Valor futuro	¢ 2 718 737 488,89	¢ 9 522 005 051,57
TCO	¢ 2 007 323 552,63	¢ 3 284 479 976,66
CCV	¢ 406 673 865,39	¢ 665 419 466,71

A partir de esta información, se elaboró el siguiente gráfico de barras apiladas para garantizar una mejor comprensión de la comparativa. En él, se muestran únicamente los costos de adquisición, de operación y de mantenimiento.

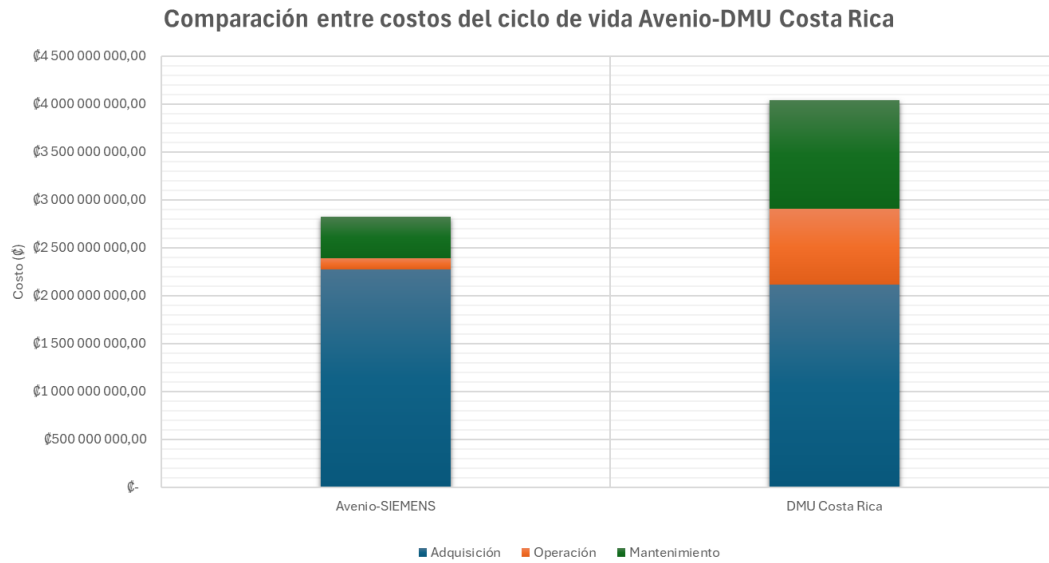


Fig. 31. Gráfico representativo de la comparación entre el modelo Avenio y el DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

De igual manera, en la siguiente tabla, se comparan estos tres costos en cuanto a su ahorro. Para el costo de adquisición, el ahorro sería más favorable en el caso del tren de combustión, el cual tiene un precio un poco menor al tren eléctrico.

Tabla 54: Ahorro en los diferentes costos del ciclo de vida de 20 años del Avenio contra el DMU para Costa Rica.

Costo	Ahorro
Operación	85,09 %
Mantenimiento	61,89 %

Ahora bien, se evaluó la tasa interna de retorno (TIR) considerando el costo de oportunidad anual en los veinte años, así como los costos totales de cada año del tren Avenio, con el propósito de evaluar su rentabilidad frente al ahorro derivado de la transición al tren eléctrico. En la siguiente tabla, se muestran los costos de oportunidad de cada año, lo que corresponde al ahorro que se tendría al optar por el tren eléctrico.

Tabla 55: Tasa interna de retorno (TIR) para el modelo Avenio-Siemens en comparación con el costo de oportunidad. Elaboración propia.

<b>Año</b>	<b>Costo oportunidad</b>	<b>Costo Total</b>
0	€ -	-€2 270 442 346,40
1	€ 41 318 779,24	€ 2 286 367 569,54
2	€ 43 351 113,81	€ 2 287 159 642,57
3	€ 45 493 458,56	€ 2 288 003 933,78
4	€ 47 752 482,05	€ 2 288 904 066,18
5	€ 50 135 288,05	€ 2 289 863 916,06
6	€ 52 649 445,03	€ 2 290 887 630,72
7	€ 55 303 017,70	€ 2 291 979 647,46
8	€ 58 104 600,74	€ 2 293 144 713,85
9	€ 61 063 354,85	€ 2 294 387 909,43
10	€ 64 189 045,31	€ 2 295 714 669,00
11	€ 67 492 083,17	€ 2 297 130 807,44
12	€ 70 983 569,34	€ 2 298 642 546,33
13	€ 74 675 341,69	€ 2 300 256 542,41
14	€ 78 580 025,41	€ 2 301 979 918,04
15	€ 82 711 086,93	€ 2 303 820 293,77
16	€ 87 082 891,46	€ 2 305 785 823,27
17	€ 91 710 764,63	€ 2 307 885 230,57
18	€ 96 611 058,32	€ 2 310 127 850,01
19	€ 101 801 221,12	€ 2 312 523 668,99
20	€ 107 299 873,66	€ 1 501 161 754,82
<b>TIR</b>		<b>43 %</b>

De este modo, se muestra que un valor de la tasa interna de retorno (TIR) de un 43% hace favorable la inversión en el tren Avenio-Siemens en comparación con el tren de combustión interna.

#### **DMU para Costa Rica-Urbos.**

Para este caso, los cálculos se llevaron a cabo de la misma manera, lo que arrojó un valor del TCO significativamente mayor para el DMU en comparación con el Urbos. Del mismo modo, el CCV resultó más elevado para el DMU, lo que demuestra que este modelo es menos rentable frente al Urbos.

Tabla 56: Comparación entre los costos del ciclo de vida del Urbos contra el DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Urbos-CAF</b>	<b>DMU para Costa Rica</b>
<b>Adquisición</b>	€ 2 157 255 160,70	€ 2 112 765 250,00
<b>Operación</b>	€ 184 527 855,22	€ 794 471 368,84
<b>Mantenimiento</b>	€ 432 379 998,97	€ 1 134 639 957,30
<b>Costo de descarte</b>	€ 773 345 606,15	€ 757 396 599,48
<b>Sumatoria</b>	€ 616 907 854,19	€ 1 929 111 326,14
<b>Valor futuro</b>	€ 3 045 028 881,63	€ 9 522 005 051,57
<b>TCO</b>	€ 2 000 817 408,74	€ 3 284 479 976,66
<b>CCV</b>	€ 405 355 752,68	€ 665 419 466,71

Asimismo, se compararon los valores de adquisición, operación y mantenimiento, para obtener un

mejor análisis de los costos de ambos trenes. En este sentido, se pudo apreciar un ligero aumento en el costo de operación del modelo Urbos, tal y como se había notado anteriormente.

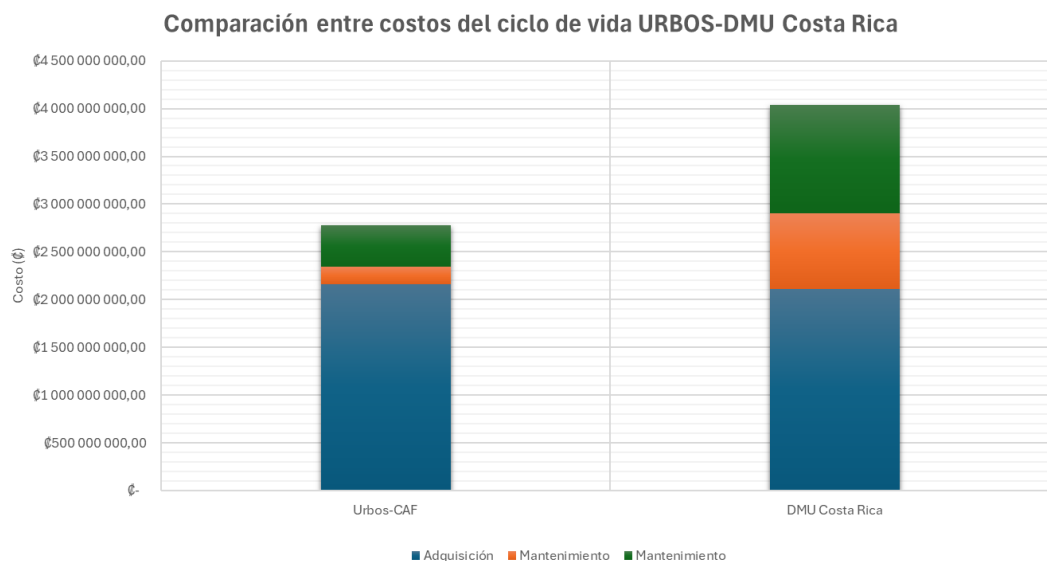


Fig. 32. Gráfico representativo de la comparación entre el modelo Urbos y el DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Seguidamente se contempló el ahorro que se tendría si se optara por el tren eléctrico Urbos ante el DMU para Costa Rica.

Tabla 57: Ahorro en los diferentes costos del ciclo de vida de 20 años del Urbos contra el DMU para Costa Rica.

Costo	Ahorro
Adquisición	6,94 %
Operación	85,09 %
Mantenimiento	61,89 %

Finalmente, se calculó la tasa interna de retorno (TIR) para el modelo Urbos, considerando los costos de oportunidad derivados de la diferencia entre los costos totales del tren DMU para Costa Rica y el tren Urbos. El análisis arrojó una TIR del 43 %, la cual es positiva también para este modelo, lo que refleja un retorno significativo bastante superior a la tasa de descuento.

Tabla 58: Tasa interna de retorno (TIR) para el modelo Urbos-CAF en comparación con el costo de oportunidad. Elaboración propia.

<b>Año</b>	<b>Costo oportunidad</b>	<b>Costo Total</b>
0	€ -	-€2 270 442 346,40
1	€ 41 318 779,24	€ 2 286 367 569,54
2	€ 43 351 113,81	€ 2 287 159 642,57
3	€ 45 493 458,56	€ 2 288 003 933,78
4	€ 47 752 482,05	€ 2 288 904 066,18
5	€ 50 135 288,05	€ 2 289 863 916,06
6	€ 52 649 445,03	€ 2 290 887 630,72
7	€ 55 303 017,70	€ 2 291 979 647,46
8	€ 58 104 600,74	€ 2 293 144 713,85
9	€ 61 063 354,85	€ 2 294 387 909,43
10	€ 64 189 045,31	€ 2 295 714 669,00
11	€ 67 492 083,17	€ 2 297 130 807,44
12	€ 70 983 569,34	€ 2 298 642 546,33
13	€ 74 675 341,69	€ 2 300 256 542,41
14	€ 78 580 025,41	€ 2 301 979 918,04
15	€ 82 711 086,93	€ 2 303 820 293,77
16	€ 87 082 891,46	€ 2 305 785 823,27
17	€ 91 710 764,63	€ 2 307 885 230,57
18	€ 96 611 058,32	€ 2 310 127 850,01
19	€ 101 801 221,12	€ 2 312 523 668,99
20	€ 107 299 873,66	€ 1 501 161 754,82
<b>TIR</b>		<b>43 %</b>

#### **Apolo 2400-Trenes eléctricos ligeros.**

Para esta comparación, se tomaron en cuenta exclusivamente los costos de operación y de mantenimiento, con el objetivo de también evidenciar el beneficio que representa el costo del ciclo de vida de un tren eléctrico frente a uno de combustión interna, destacando que, incluso, los costos de mantenimiento se duplican en este último. No se incluyó el costo de adquisición debido a la falta de información sobre el precio original del Apolo 2400 al inicio de su vida útil en la década de los años 1980.

Tabla 59: Comparación entre los costos del modelo Apolo 2400, el Avenio y el Urbos. Elaboración propia.

<b>Descripción</b>	<b>Tren Apolo 2400</b>	<b>Tren Avenio</b>	<b>Tren Urbos</b>
<b>Adquisición</b>	€ 259 235 000,00	€ 2 270 442 346,40	€ 2 157 255 160,70
<b>Operación</b>	€ 291 734 771,61	€ 118 422 826,09	€ 184 527 855,22
<b>Mantenimiento</b>	€ 883 256 072,15	€ 432 379 998,97	€ 432 379 998,97
<b>Costo de descarte</b>	€ 75 205 691,42	€ 813 921 618,82	€ 773 345 606,15
<b>Sumatoria</b>	€ 1 174 990 843,75	€ 550 802 825,06	€ 616 907 854,19
<b>Valor futuro</b>	€ 5 799 700 928,70	€ 2 718 737 488,89	€ 3 045 028 881,63
<b>TCO</b>	€ 1 359 020 152,33	€ 2 007 323 552,63	€ 2 000 817 408,74
<b>CCV</b>	€ 275 330 789,48	€ 406 673 865,39	€ 405 355 752,68

Para entender de una mejor manera la comparación entre los costos de mantenimiento y operación de los trenes, se realizó el siguiente gráfico de barras apiladas.

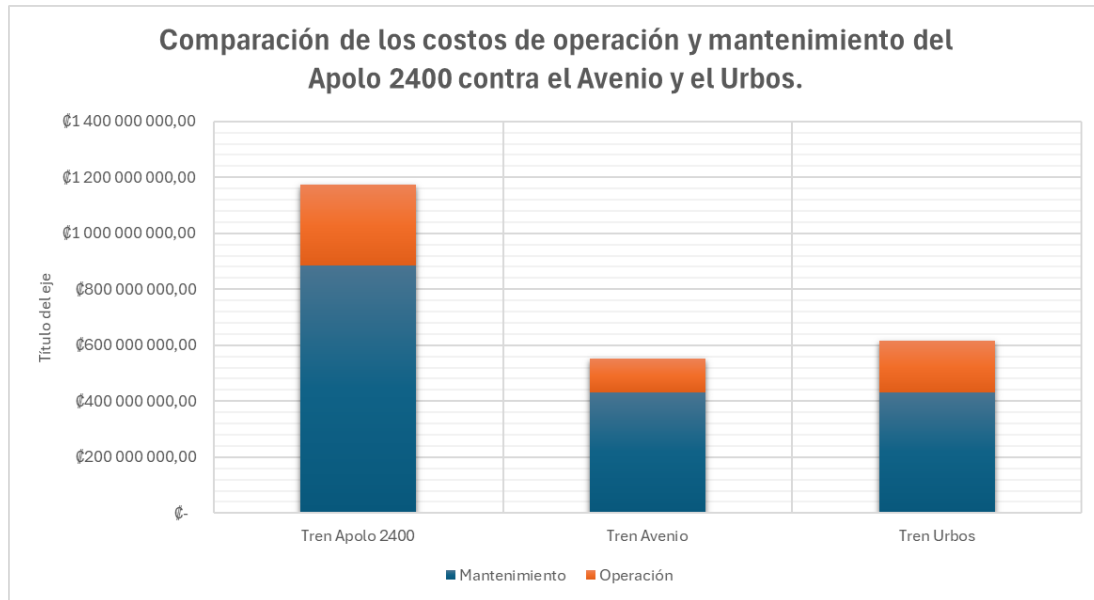


Fig. 33. Gráfico representativo de la comparación entre el modelo Apolo 2400, el Avenio y el Urbos. Elaboración propia.

Por último, se calculó el ahorro que se tendría en los costos de operación y mantenimiento al optar por alguno de los dos modelos eléctricos en comparación con el Apolo 2400.

Tabla 60: Ahorro en el costo de operación y mantenimiento de los Apolo contra los Avenio y Urbos. Elaboración propia.

Costo	Ahorro Avenio	Ahorro Urbos
<b>Operación</b>	59,41 %	36,75 %
<b>Mantenimiento</b>	51,05 %	51,05 %

## Objetivo 4.

**Determinar el impacto ambiental y a la salud de una eventual transición a trenes eléctricos a través de una cuantificación teórica de gases de efecto invernadero y de ahorro energético con miras a una transición efectiva y fundamentada.**

En cuanto a la evaluación del impacto en el ambiente y en la salud, se implementaron diversos métodos de estudio. En primer lugar, se evaluó un análisis sobre los gases de efecto invernadero (GEI) generados por cada modelo de tren: el DMU para Costa Rica y los trenes eléctricos Avenio y Urbos. El modelo Apolo 2400 no fue incluido en dicho análisis debido a la falta de datos sobre su consumo de combustible por kilómetro.

En segundo lugar, se desarrolló una exploración acerca del impacto social, fundamentada en criterios establecidos en diversos estudios y evaluaciones sobre este tema.

### **Impacto ambiental.**

Como se mencionó al inicio de este trabajo, el sector transporte es el principal emisor de gases de efecto invernadero no solo en el país, sino también a nivel mundial. Uno de los mayores desafíos radica en el mal manejo de la distribución de los sistemas de transporte existentes, ya que, a mayor emisión por kilómetro por pasajero, mayor será la liberación de gases contaminantes, lo que es más perjudicial para el ambiente.

Entre los gases de efecto invernadero liberados al ambiente debido al transporte en Costa Rica, se encuentra el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{N}_2\text{O}$ , siendo el de  $\text{CO}_2$  el gas contaminante que más se libera [3]. En el siguiente diagrama se puede observar el gran impacto negativo que tiene el sector de transporte en el medioambiente en Costa Rica.

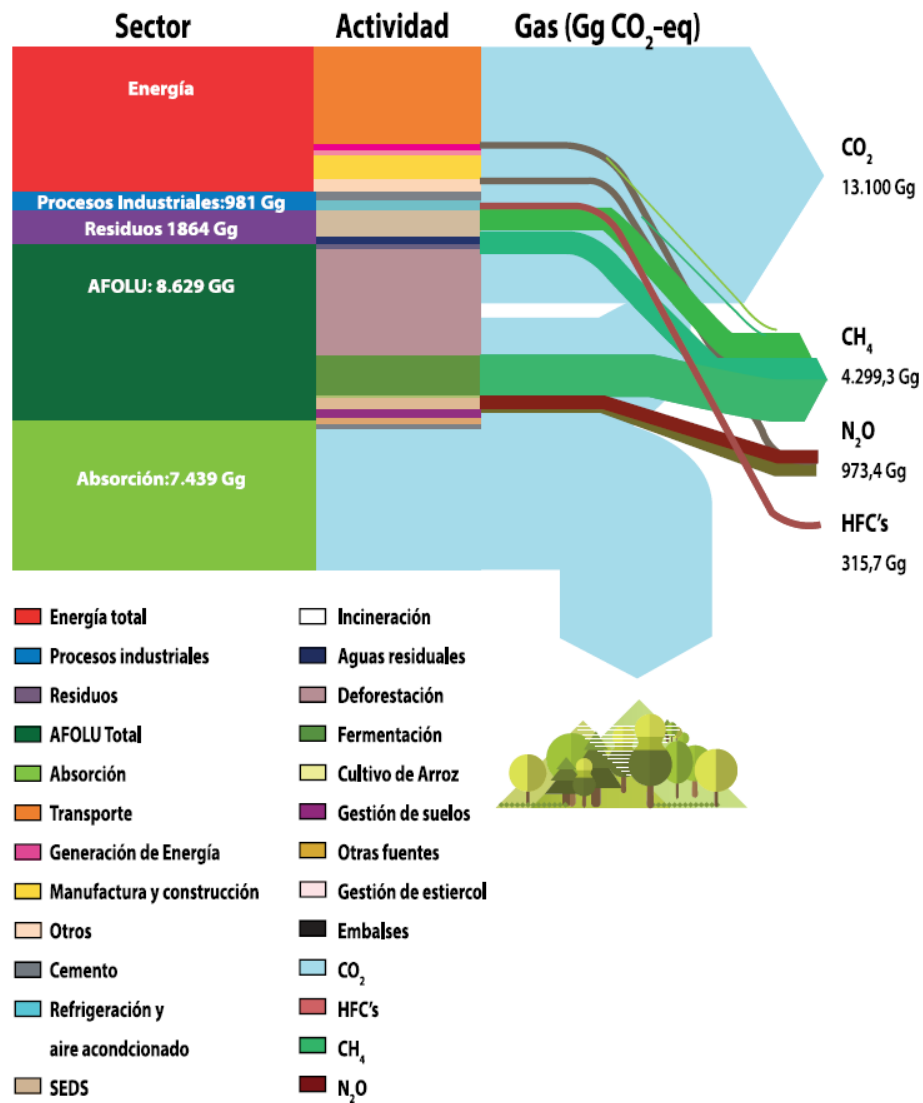


Fig. 34. Contribución sectorial a la Carbonización en Costa Rica [3].

Uno de los principales factores que impactan la gráfica anterior es el crecimiento en el número de vehículos privados en comparación con la flota de transporte masivo. En Costa Rica, el número de vehículos aumentó de 418.048 unidades hace veinte años a 1.347.000 en 2015, de los cuales más del 60 % corresponde a vehículos privados [3]. Este incremento ha provocado una mayor dependencia hacia el consumo de hidrocarburos en el sector de transporte, especialmente en el privado. En 1996, el país adquiría más de 6 millones de barriles de combustible anuales, cifra que aumentó a más de 20 millones en 2016 [3], y superó los 23 millones en 2023, con una proyección de crecimiento para 2024 [119].

El principal problema relacionado con lo anterior es el recurrir desproporcionadamente al transporte privado, el cual consume un 50 % del total de energía del sector de transporte, mientras que el transporte público apenas alcanza un 10,13 % [3]. En contraste, diariamente 2.5 millones de personas en el país utilizan algún medio de transporte, de las cuales cerca del 70 % emplea transporte público [1], Este último genera únicamente cerca del 7 % de las emisiones de CO del total de los medios de transporte, mientras

que más del 40 % de esas emisiones provienen del uso de vehículos particulares [15], como se ilustra en la siguiente figura.

**Costa Rica: contribución porcentual de las emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de vehículo en el 2010.**

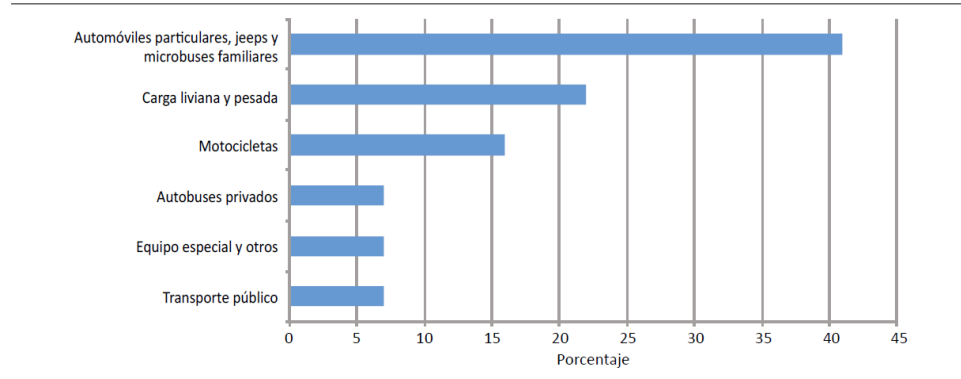


Fig. 35. Porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> según el tipo de vehículo en el 2010 [15].

Esta gráfica muestra un verdadero problema en cuanto a las emisiones de GEI debido a la ineficiente distribución del transporte según el tipo de vehículo en el país. Además de ello, se evidencia una clara ventaja en el uso de transporte público masivo de personas en cuanto a las emisiones liberadas por pasajero.

**Tren de combustión interna DMU para Costa Rica.**

**Emisiones de GEI.** Con el fin de determinar el impacto ambiental del tren de combustión interna DMU, se evaluó la cantidad de gases de efecto invernadero liberados por año y por pasajero. Para esto, se obtuvo la cantidad de pasajeros que se movilizan dentro del GAM anualmente, tomando como referencia la cantidad de personas movilizadas durante el 2023, la cual fue de 3.515.131 [120]. Esta cifra representa el total de pasajeros transportados en todas las rutas del tren dentro del GAM, en las que operan tanto el Apolo 2400 como el DMU para Costa Rica; sin embargo, debido a la falta de datos exactos sobre el número de pasajeros transportados por el DMU, se empleó esa misma cantidad mencionada para efectos de practicidad.

Para empezar, se determinó la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> por año según el factor de emisión establecido por el Instituto Meteorológico Nacional, el cual es de 0,002613 t CO<sub>2</sub>/L [121]. En la siguiente tabla, se evaluó la cantidad de emisiones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año.

Tabla 61: Emisiones de toneladas de CO<sub>2</sub> liberadas al año del DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Valor
L/km	2,6
Emisiones (t CO <sub>2</sub> /km)	0,006794
Kilómetros por año	912 912
Emisiones de t CO <sub>2</sub> por año	6 202,14

Posteriormente, se evaluaron las emisiones de CO<sub>2</sub> por pasajero del DMU para Costa Rica. Para ello, se tomó en cuenta la cantidad de pasajeros previamente mencionada y las toneladas de CO<sub>2</sub> calculadas

en la Tabla 61.

Tabla 62: Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> por pasajero generadas por el tren DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Emisiones de t CO <sub>2</sub> por año	6 202,14
Pasajeros por año	3 515 131
Emisiones por pasajero (kg CO <sub>2</sub> /pass)	1,7644

En cuanto a las emisiones de CH<sub>4</sub> el análisis se realizó de la misma manera, pero con un factor de emisión de 0,149 g CH<sub>4</sub>/L según lo indicado por el Instituto Meteorológico Nacional [121].

Tabla 63: Emisiones de gramos de CH<sub>4</sub> liberadas al año del DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Valor
L/km	2,6
Emisiones (g CH <sub>4</sub> /km)	0,3874
Kilómetros por año	912 912
Emisiones g CH <sub>4</sub> /km por año	353 662,11

De manera similar, se estimó la cantidad de gramos de CH<sub>4</sub> emitidos por pasajero por parte del tren DMU para Costa Rica. Los resultados de este cálculo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 64: Emisiones anuales de CH<sub>4</sub> por pasajero generadas por el tren DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Emisiones g CH <sub>4</sub> /km por año	353 662,11
Pasajeros por año	3 515 131
Emisiones por pasajero (g CH <sub>4</sub> /pass)	0,1006

Continuando con el análisis, se cuantificó la cantidad de N<sub>2</sub>O liberado al medioambiente por el tren modelo 3100 DMU para Costa Rica. Para esto, se utilizó el factor de emisión de diésel indicado por el Instituto Meteorológico Nacional, el cual corresponde a 0,1416 g N<sub>2</sub>O/L [121].

Tabla 65: Emisiones de gramos de N<sub>2</sub>O liberadas al año del DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Valor
L/km	2,6
Emisiones (g N <sub>2</sub> O/km)	0,4004
Kilómetros por año	912 912
Emisiones g N <sub>2</sub> O/km por año	365 529,97

Del mismo modo, se desarrolló el cálculo de gramos de N<sub>2</sub>O liberados al ambiente por pasajero transportado anualmente en el DMU para Costa Rica.

Tabla 66: Emisiones anuales de N<sub>2</sub>O por pasajero generadas por el tren DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Emisiones g N <sub>2</sub> O/km por año	365 529,97
Pasajeros por año	3 515 131
Emisiones por pasajero (g N <sub>2</sub> O/pass)	0,104

Por último, se realizó el cálculo del potencial de calentamiento global (GWP) en un horizonte temporal de 100 años (GWP-100) para obtener un valor aproximado por pasajero. Para esto, se utilizaron los siguientes valores de GWP: 1 para el CO<sub>2</sub>, 25 para el CH<sub>4</sub> y 298 para el N<sub>2</sub>O [122]. Estos valores se multiplicaron por la cantidad de gas emitido en kilogramos, resultando en el equivalente de CO<sub>2</sub> por pasajero.

Tabla 67: Potencial del Calentamiento Global (GWP) por pasajero del tren DMU para Costa Rica. Elaboración propia.

Gas	Valores de GWP	Valor (kg)
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	1	6 202 141,55
Metano CH <sub>4</sub>	25	8 841,55
Óxido nitroso N <sub>2</sub> O	298	108 927,93
<b>Emisiones totales (kg CO<sub>2</sub>-Eq)</b>		<b>6 319 911,03</b>
<b>Emisiones totales (kg CO<sub>2</sub>-Eq/pass)</b>		<b>1,7979</b>

**Emisiones de ruido.** De acuerdo con un estudio sobre el impacto sonoro del tren de CI en Costa Rica, se determinaron niveles promedio de sonido en diferentes estaciones. En dicho estudio, se registró un máximo de 110 dB en una estación [123]. Esta medición se realizó en las estaciones, ya que son los lugares donde el ruido es más evidente, principalmente debido al sonido de la pitoreta del tren [123]. A continuación, se presentan los resultados de este estudio.

Percentil	Estación UCR	Estación U Latina	Estación CFIA	Estación Tres Ríos
L 90 (ambiente)	50 dB	55 dB	42 dB	50 dB
L 50 (media)	55 dB	70 dB	45 dB	70 dB
L 10 (máximos)	75 dB	80 dB	65 dB	80 dB

Fig. 36. Niveles sonoros promedio identificados en las estaciones de estudio [123].

Los niveles anteriormente expuestos superan por mucho lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para sistemas ferroviarios. El valor sugerido como promedio es de 54 dB [124], y, como se puede observar en la Figura 36, la mayoría de los valores registrados superaron este umbral de decibelios.

### Trenes eléctricos Avenio-Siemens y Urbos-CAF.

En el caso de los trenes eléctricos, se evaluaron varios factores relevantes relacionados con su sostenibilidad, como su lista de materiales y el porcentaje de estos que puede ser reciclado. También se llevó a cabo un análisis de las emisiones de GEI liberadas al ambiente, y se estudió el impacto de las emisiones de ruido establecidas en sus EPD.

**Materiales y reciclaje.** En páginas anteriores, específicamente en el análisis del costo del ciclo de vida, se explicaron los porcentajes de reciclabilidad de los trenes eléctricos según sus EPD. En esta sección, se determinaron los porcentajes de dichos materiales que se pueden reciclar al final del ciclo de vida.

En primer lugar, para el Urbos-CAF, se estiman los siguientes materiales, expresados en porcentajes de la totalidad del tren:

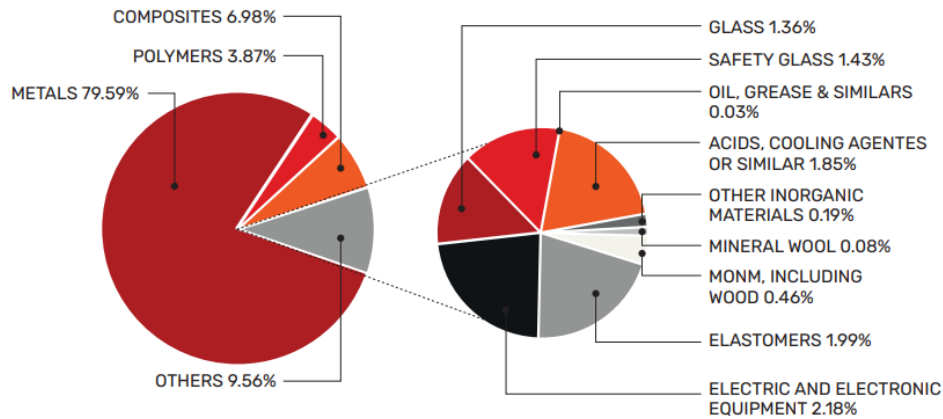


Fig. 37. Composición de materiales del tren modelo Urbos-CAF. [63].

De la totalidad de los materiales anteriormente expuestos, es posible reciclar el 92,70% [63]. Por otra parte, el tren Avenio-SIEMENS está conformado por los siguientes porcentajes de material:

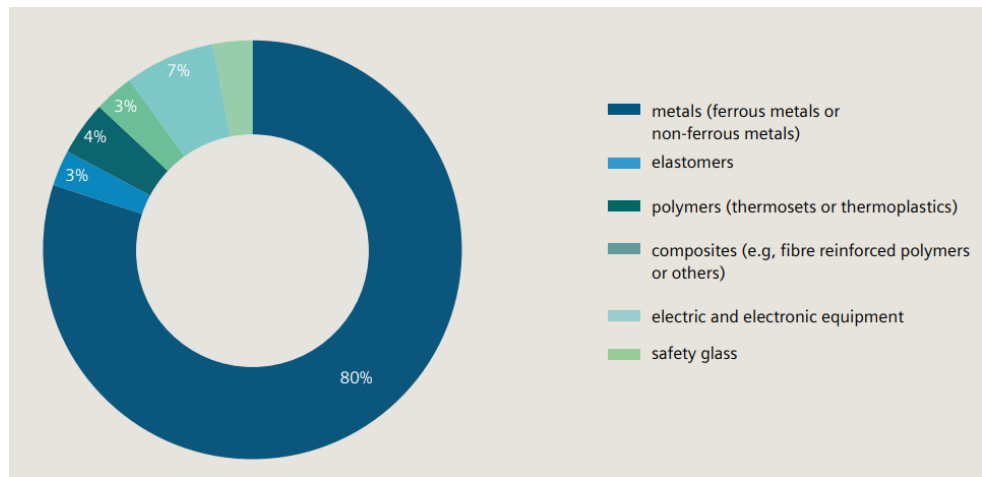


Fig. 38. Composición de materiales del tren modelo Avenio-Siemens. [62].

Aproximadamente, el 93,2% de los componentes del material rodante de dicho modelo puede ser reciclado.

**Emisiones de GEI tren Avenio-Siemens.** Para determinar las emisiones de CO<sub>2</sub>, se utiliza un factor de emisión de 0,0879 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh, según lo expuesto por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [125]. Para ello, se realiza el mismo procedimiento utilizado en el análisis del tren de combustión interna, en donde se cuantifican los gases de efecto invernadero a partir del consumo energético de la unidad férrea, en este caso a partir de los kWh/km.

Tabla 68: Emisiones de CO<sub>2</sub> del tren Avenio-Siemens. Elaboración propia.

Descripción	Valor
kWh/km	3,87
Emisiones (kg CO <sub>2</sub> eq/km)	0,3402
Kilómetros por año	912 912
Emisiones de kg CO <sub>2</sub> eq por año	310 548,014

Seguidamente, se cuantificaron, a partir de lo anterior, las emisiones de kilogramos de CO<sub>2</sub> por pasajero transportado.

Tabla 69: Emisiones de CO<sub>2</sub> por pasajero del tren Avenio-Siemens. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Emisiones de kg CO <sub>2</sub> eq por año	310 548,014
Pasajeros por año	3 515 131
Emisiones por pasajero (kg CO <sub>2</sub> eq/pass)	0,08835

Por último, se determinó el Potencial del Calentamiento Global (GWP), el cual determinó las emisiones de CO<sub>2</sub> en kg, tomando en cuenta la generación de energía a partir del porcentaje de energías limpias del año 2024.

Tabla 70: Potencial del Calentamiento Global (GWP) por pasajero del tren Avenio-Siemens.

Descripción	Valor
Emisiones totales (kg CO <sub>2</sub> -Eq/pass)	0,008835

**Emisiones de GEI tren Urbos-CAF.** De la misma manera, se utilizó el factor de emisión de kg CO<sub>2</sub>/kWh de 0,004 recomendado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [125]. El resultado obtenido corresponde al siguiente:

Tabla 71: Emisiones de CO<sub>2</sub> del tren Urbos-CAF. Elaboración propia.

Descripción	Valor
kWh/km	6,0303
Emisiones (kg CO <sub>2</sub> eq/km)	0,530062
Kilómetros por año	912 912
Emisiones de kg CO <sub>2</sub> eq por año	483 899,6063

A continuación, se adjuntan los valores obtenidos de las emisiones de CO<sub>2</sub> por pasajero del Urbos-CAF.

Tabla 72: Emisiones de CO<sub>2</sub> por pasajero del tren Urbos-CAF. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Emisiones de kg CO <sub>2</sub> eq por año	483 899,6063
Pasajeros por año	3 515 131
Emisiones por pasajero (kg CO <sub>2</sub> eq/pass)	0,1377

Por su parte, se obtuvo el valor del GWP relacionado con las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en kilogramos por pasajero, según el uso de combustibles fósiles en la obtención de energía eléctrica en Costa Rica.

Tabla 73: Potencial del Calentamiento Global (GWP) por pasajero del tren Urbos-CAF.

Descripción	Valor
Emisiones totales (kg CO <sub>2</sub> -Eq/pass)	0,1377

**Emisiones de ruido.** Como se mencionó anteriormente, se obtuvieron los valores relacionados a las emisiones del ruido de ambos trenes eléctricos a partir de sus EPD. A continuación, se muestra una tabla en la que se presentan dichos valores para el tren Avenio-Siemens y el Urbos-CAF.

Tabla 74: Emisiones de ruido de ambos modelos de trenes eléctricos: Avenio-Siemens y Urbos-CAF. [116] [63]

Modelo	Valor (dB) Máx.
Avenio-Siemens	78
Urbos-CAF	78

### Comparación del tren de combustión interna en contraste con los trenes eléctricos.

Con el propósito de contrastar el impacto ambiental en cuanto a las emisiones de cada uno de los trenes, se realizaron tres gráficos de barras que reflejan las emisiones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, el potencial de calentamiento global (GWP) y los niveles de emisión sonido.

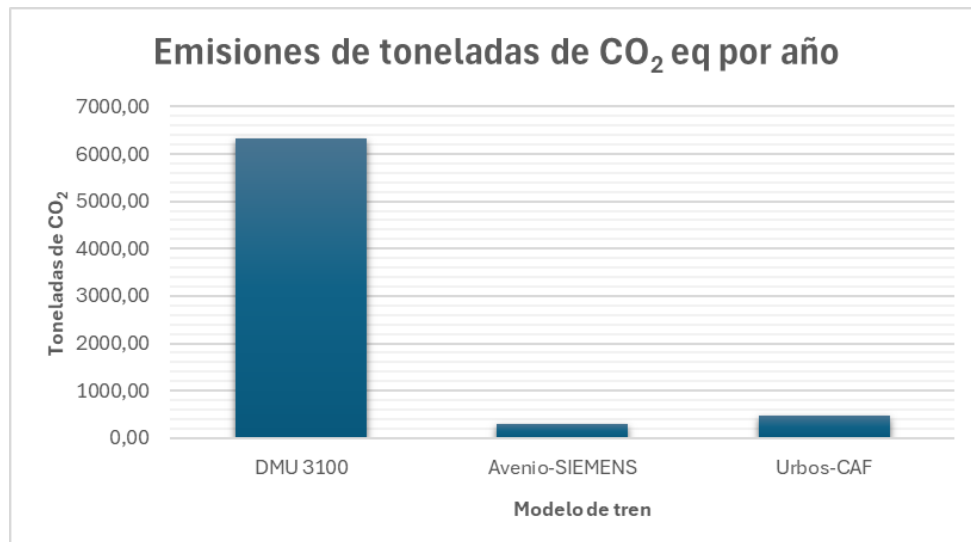


Fig. 39. Gráfico comparativo de las emisiones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año para cada modelo. Elaboración propia.

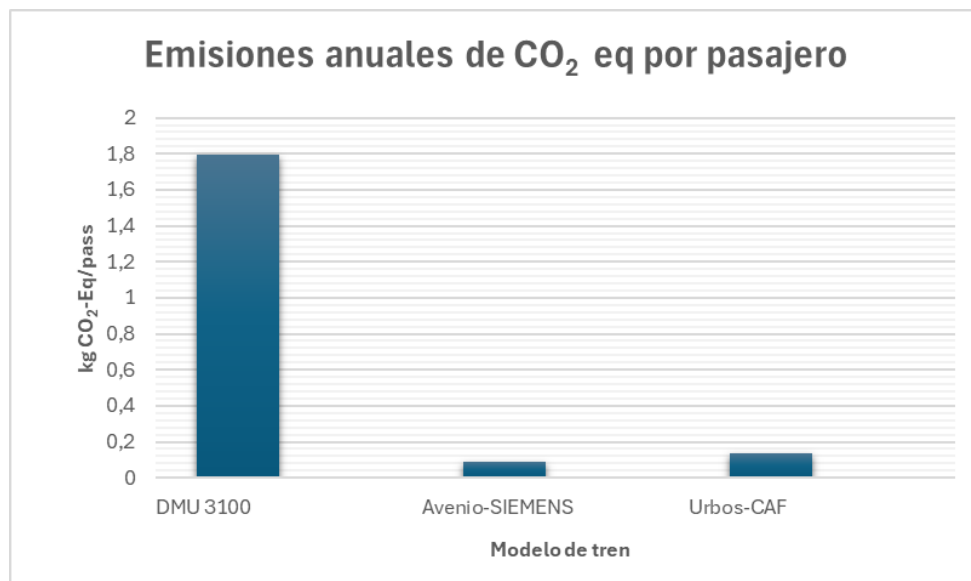


Fig. 40. Gráfico comparativo del potencial del calentamiento global para cada uno de los trenes. Elaboración propia.

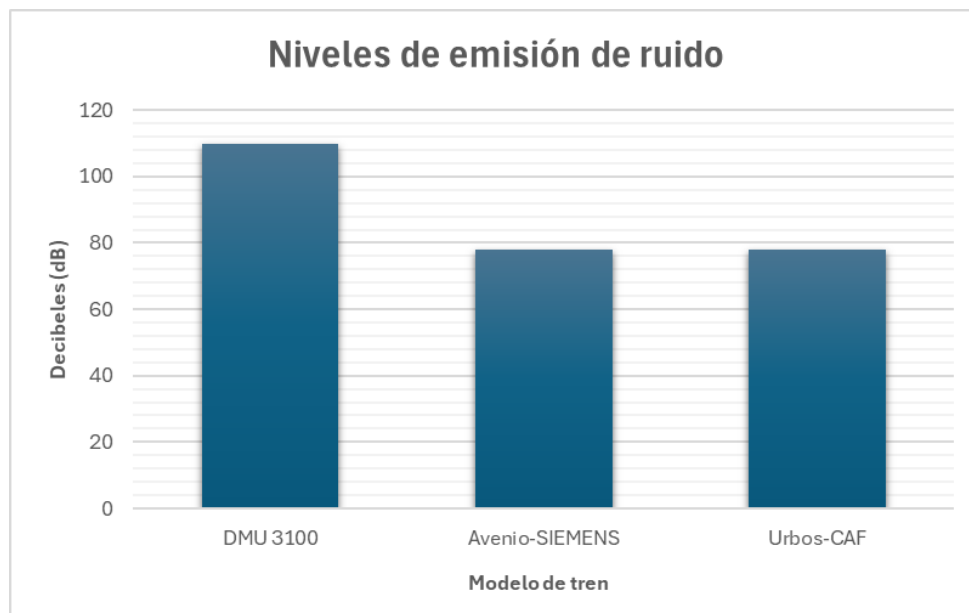


Fig. 41. Gráfico comparativo de las emisiones del ruido.

En las tres figuras anteriores, se puede apreciar una importante diferencia entre el tren de combustión interna DMU para Costa Rica y los dos modelos eléctricos estudiados. Las emisiones del DMU superan ampliamente a las casi nulas de los trenes eléctricos. Como se observa en la Figura 40, el potencial de calentamiento global a 100 años será considerablemente mayor con el tren de diésel que recorre las vías del GAM en la actualidad, en comparación con cualquiera de los dos trenes eléctricos.

### Impacto a la salud.

El optar por una opción de tren eléctrico en sustitución de uno de combustión interna trae muchos beneficios a la salud pública, ya que las emisiones se ven reducidas y con ello, la contaminación del aire disminuye. Esto es especialmente importante cuando los trenes deben desplazarse por zonas de alta densidad poblacional [126].

La mala distribución de la población genera un aumento de la densidad urbana en el GAM, lo que a su vez incrementa la contaminación ambiental. A partir de este fenómeno, se dividen varios factores, principalmente relacionados con un sistema de transporte ineficiente y poco centrado en el transporte masivo. La congestión vial impacta directamente en la calidad de vida, contribuyendo a problemas como la violencia y el aumento de accidentes de tránsito. Además, estas congestiones agravan la contaminación del aire debido a las emisiones de GEI, al tiempo que se prolongan los viajes y se evidencia la falta de fortalecimiento del transporte público [1].

Lo anterior está estrechamente relacionado con el impacto económico del país, el cual afecta tanto a la salud pública como al bienestar social. El sector transporte es una de las actividades económicas que más dinamiza la economía, ya sea variándola a favor o en contra. En términos de producción, el transporte representaba un 3,9% del PIB en el 2012, y para el año 2017, este llegó a crecer al 4,5%, lo cual equivale a \$1.900 millones [1].

El impacto ambiental afecta directamente la salud, y ambos, a su vez, están vinculados con las reper-

cusiones económicas del país. La ineficiencia del sistema de transporte en el país genera externalidades que no se asumen, pero que resultan en pérdidas económicas y que afectan la salud pública [1]. A continuación, se presentan los costos asociados al deficiente transporte en Costa Rica.

Tabla 75: Costos no asumidos debido al deterioro del transporte. [1]

Detalle	Costo (millones de dólares)
Emisiones de GEI	\$ 17
Calidad del aire	\$ 176,9
Ruido	\$ 11,9
Siniestros	\$ 1 864,3
Congestión	\$ 691,2

Otros autores indican que las externalidades negativas vinculadas con un transporte no sustentable equivalen al 10% del PIB del país, del cual un 4% representa el impacto a la salud que se traduce en accidentes de tránsito, contaminación del aire e inactividad física [1].

Por su parte, otro de los beneficios que se intentan cuantificar es la derivación de las políticas de descarbonización. En este sentido, la Agencia Internacional de la Energía calculó que, si la inversión necesaria para tener aire limpio se aumenta en un 7%, esto podría salvar a tres millones de personas de una muerte prematura para 2040 [3]. Asimismo, en el año 2012, se estimaba que la contaminación atmosférica causaba 3,7 millones de defunciones prematuras anuales [15].

Al comparar lo mencionado anteriormente con los datos mostrados en la gráfica de la Figura 39, se comprueba que el cambio de una flota de trenes de combustión interna a una de trenes eléctricos resultaría en una reducción significativa de los contaminantes en el aire. La cantidad de emisiones de dióxido de carbono de un tren eléctrico representa menos del 4% del total de emisiones de una unidad de tren diésel. Ahora bien, según se observa en la Figura 40, el tren de combustión interna DMU tiene un impacto considerable en el calentamiento global a 100 años, mientras que el impacto a largo plazo de un tren eléctrico es significativamente menor. Este panorama, a su vez, contribuye al deterioro de la salud pública.

Por otra parte, las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen un impacto económico que se refleja en lo social. El costo social del CO<sub>2</sub> es de aproximadamente \$40 por tonelada [114]. En la siguiente tabla, se muestran los costos sociales relacionados con las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada uno de los trenes durante un año de uso.

Tabla 76: Costos sociales al año asociados a las emisiones de gases de CO<sub>2</sub> por cada modelo de tren. Elaboración propia.

Tren	Emisiones CO2 por año	Costo social
DMU 3100	6361,17	\$ 254 446,83
Avenio-Siemens	141,32	\$ 5 652,75
Urbos-CAF	220,20	\$ 8 808,18

El costo social del CO<sub>2</sub> refleja el costo global de la emisión de una tonelada adicional de CO<sub>2</sub>, considerando todos los daños que causará mientras permanezca en la atmósfera. En otras palabras, indica cuánto estaría dispuesta a pagar la sociedad actual para evitar futuros daños provocados por la emisión de una tonelada de carbono. En este contexto, el costo social del DMU para Costa Rica es de \$254,446.83 por año. A futuro, se prevé que habrá un impacto en el bienestar social con una reducción de consumo de \$254,446.83.

Para finalizar el estudio, se evaluó la energía consumida por cada uno de los trenes, para comprobar el ahorro energético que representan los trenes eléctricos en comparación con los de combustión interna.

Para lograrlo, se realizó la conversión de los litros de combustible por kilómetro del tren DMU para Costa Rica a kWh equivalentes, y posteriormente, se calcularon los valores de kWh para cada tren en MJ.

Tabla 77: Consumo energético de los trenes evaluados por kilómetro. Elaboración propia.

<b>Modelo del tren</b>	<b>Consumo por kilómetro</b>	<b>kWh equivalente</b>	<b>Energía (MJ)</b>
DMU para Costa Rica (L/km)	2,60	28,50	102,59
Avenio-Siemens (kWh/km)	3,87	3,87	13,93
Urbos-CAF (kWh/km)	6,03	6,03	21,71

Seguidamente, se estableció el ahorro energético que tendrían los trenes eléctricos en comparación con el tren de combustión interna.

Tabla 78: Ahorro energético de los trenes eléctricos en comparación con los trenes de combustión interna. Elaboración propia.

<b>Modelo del tren</b>	<b>Porcentaje de ahorro</b>
Avenio-Siemens	86,42 %
Urbos-CAF	78,84 %

# Conclusiones y recomendaciones.

## Conclusiones.

- Se realizó un análisis técnico de los dos trenes de pasajeros que transitan actualmente en la línea férrea de pasajeros en Costa Rica. Asimismo, se evaluaron trenes eléctricos con características básicas similares que cumplieran con lo requerido en el país. Lo anterior permitió determinar la escogencia de los trenes modelo Avenio de la fabricante Siemens y el Urbos de la fabricante CAF para el estudio, los cuales poseen costos de adquisición competentes en el mercado y características favorables para el análisis comparativo.
- Por medio de la consulta de diferentes estudios teóricos y prácticos, se determinó la infraestructura adecuada con diversas características operativas, con el fin de comprender el sistema eléctrico necesario para las subestaciones requeridas en la alimentación de un eventual tren eléctrico ligero. Como resultado, se obtuvo una instalación eléctrica preliminar, evaluando también las potencias requeridas en las diferentes subestaciones para las tres líneas férreas del GAM; se definió una potencia promedio de 900 kW por subestación.
- Se desarrolló un análisis comparativo de los costos del ciclo de vida útil de cada uno de los cuatro trenes, el Apolo 2100, el DMU para Costa Rica (3100), el Avenio-Siemens y el Urbos-CAF. Para dicho análisis, se evaluaron los costos de adquisición, de operación, de mantenimiento y de descarte, comparándolos entre sí, y se determinó que los trenes de combustión interna que operan actualmente en el país representan costos mayores si se les compara con los del ciclo de vida de ambos trenes eléctricos. Esto permite establecer una tasa interna de retorno favorable para los trenes eléctricos, destacando el ahorro en costos de oportunidad al optar por ellos en lugar de los trenes de combustión interna.
- Finalmente, se determinó el impacto ambiental mediante las emisiones de los diferentes gases de efecto invernadero (GEI), evaluando la cantidad de kg de CO<sub>2</sub> liberados al ambiente y su impacto a futuro por medio de GWP-100, lo que dio como resultado que el tren de combustión interna posee un significativo impacto a largo plazo en comparación con los trenes eléctricos. Además, se determinó un costo social asociado a estas emisiones, lo que conlleva consecuencias para la salud de la población costarricense y los costos derivados de un sistema de transporte ineficiente. Este análisis revela un ahorro social y económico significativo derivado de la transición hacia trenes eléctricos.

## Recomendaciones.

- La industria ferroviaria cada vez está siendo más solicitada por países desarrollados debido a que permite la movilización de la economía dentro y fuera de sus fronteras. Sin embargo, en países en vías de desarrollo, se ha vuelto más una necesidad básica para poder encontrar el progreso que buscan. Existe una notable escasez de personas interesadas en esta industria en países en vías de desarrollo ignorando el gran impacto económico que existe en su implementación. Según la teoría keynesiana, un déficit presupuestario temporal puede estimular la economía y reducir desigualdades en un país si el gasto público complementa al privado. No obstante, para lograr una solución sostenible, es necesario considerar factores estructurales e institucionales que garanticen una gestión eficiente de los recursos, esto conlleva un mayor gasto público para incrementar la economía del país [127].
- El análisis del costo del ciclo de vida útil muestra resultados positivos para la toma de decisiones sobre la adopción de nuevas tecnologías frente a las ya existentes. No obstante, este análisis señala la necesidad de una evaluación más profunda para su implementación en Costa Rica, considerando aspectos como la infraestructura completa, las rutas y los puntos clave necesarios para impulsar su desarrollo. Agregado a lo anterior, se recomienda el desarrollo de un análisis comparativo de costos, del impacto ambiental y social del transporte en carreteras versus el transporte ferroviario en Costa Rica.
- La utilización de energías limpias y renovables en la industria del transporte son necesarias actualmente, debido al gran impacto que tienen en el ambiente. Se requiere de un enfoque más centralizado en estas energías limpias para satisfacer las demandas de una de las áreas que más contaminan con gases de efecto invernadero, esto debido a ser el área que más consume hidrocarburos y, por ende, emite mayores gases de efecto invernadero [15], lo que se traduce a mayor inversión a futuro sino se trata este tema en los próximos años.

# Bibliografía

- [1] L. Sánchez, “Diagnóstico sobre la situación del transporte y la movilidad en costa rica,” *Estado de la Nación*, 2018.
- [2] “The benefits of public transportation,” *Tourism Transport Forum (TTF)*, 2010.
- [3] “Plan nacional de descarbonización 2018-2050,” *Descarbonicemos Costa Rica*, 2019.
- [4] GIZ, “Retrato del transporte y la movilidad en costa rica,” *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*, 2021.
- [5] “Acuerdo de París.” Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015.
- [6] T. P. DiNapoli, “Financial outlook for the metropolitan transportation authority,” *Office of the New York State Comptroller*, 2019.
- [7] J. R. Vargas, “Prospectiva del empleo a partir de la matriz insumo producto 2011 el caso de costa rica,” *Estado de la Nación*, 2014.
- [8] S. Egloff, J. Molina, R. Castro, J. Alfredo, C. Donato, O. Arce, G. Monge, L. Guillermo, F. Villalobos, and J. Sauma, “Costa rica: Una propuesta para superar la crisis de movilidad actual (2018-2022),” *Grupo de Análisis sobre Sistemas de Transporte y Movilidad*, 2018.
- [9] ARESEP, “Informe sobre la calidad del servicio público de hidrocarburos líquidos y asfaltos,” *Intendencia de Energía*, 2019.
- [10] N. Dopovich, D. Rajagopal, E. Tasar, and A. Phadke, “Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric,” *Natural Energy*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00915-5>
- [11] A. Kurian, “Intervenções básicas do sistema de tração,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Noviembre 2017.
- [12] D. Gattuso and A. Restuccia, “A tool for railway transport cost evaluation,” Mediterranean University of Reggio Calabria, Tech. Rep., 2013.
- [13] K. Logan, J. Nelson, B. McLellan, and A. Hasting, “Electric and hydrogen rail: Potential contribution to net zero in the uk,” *ELSEVIER*, 2020.
- [14] “Traction decarbonisation network strategy,” *Network Rail*, 2020.
- [15] MINAE, “Vii plan nacional de energía 2015-2030,” 2015.
- [16] L. Sánchez, “Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en américa latina y el caribe: Una revisión general,” *Unión Europea y las Naciones Unidas*, 2015.

- [17] G. Merlo, "Por qué el transporte de bajas emisiones es clave para américa latina y el caribe," *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*, 2023.
- [18] "Transport and environment report 2021 decarbonising road transport —the role of vehicles, fuels and transport demand," *European Environment Agency*, 2022.
- [19] "Transport and environment report 2022 digitalisation in the mobility system: challenges and opportunities," *European Environment Agency*, 2022.
- [20] "Trends and projections in europe 2023," *European Environment Agency*, 2023.
- [21] A. H. Loncán, "El impacto directo del ferrocarril sobre el crecimiento económico argentino durante la primera globalización," *Departamento de Historia e Instituciones Económicas, Universitat de Barcelona*, 2011.
- [22] R. S. Heralova, "Life cycle costing as an important contribution to feasibility study in construction projects7," *Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Thakurova 7, 166 29 Prague, Czech Republic*, 2017.
- [23] "Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030," *Ministerio del Ambiente y Energía*, 2019.
- [24] A. Berbey, R. Cabballero, J. Sanz, J. Brunel, K. Guerra, J. Flores, A. Samaniego, and W. Orozco, "Trenes: material rodante del transporte ferroviario," *Prisma Tecnológico*, 2013.
- [25] S. Chandra and M. Agarwal, *Railway Engineering*. Oxford University Press, 2007.
- [26] A. Berbey, R. Caballero, J. S. Bobi, J. Brunel, K. Guerra, J. Flores, A. Samaniego, and W. Orozco, "Trenes: material rodante del transporte ferroviario," *Prisma Tecnológico*, 2013.
- [27] F. González, *Sistemas Ferroviarios: Planificación, Ingeniería y Explotación*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2018.
- [28] "Variables: Nivel y pendiente," *Ministerio de Hacienda*, 2021.
- [29] "Términos ferroviarios," *Departamento de transporte terrestre.*, 2022.
- [30] "Tranvía sin catenaria desarrollado por CAF y basado en el empleo de ultracondensadores," *Vía Libre*, 2009.
- [31] R. Medina, D. Morales, B. Tapia, D. Criollo, J. Romero, P. Guamán, and P. Arévalo, "Modelado del tranvía citadis-302 implementado en la ciudad de cuenca utilizando matlab - simulink®," *Revista Técnica "Energía"*, 2015.
- [32] "Public transportation system," *UN habitat: Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos*, 2018.
- [33] "2002 status of the nation's highways, bridges, and transit: Conditions performance," *U.S. Department of Transportation*, 2002.
- [34] V. Islas and M. Lelis, "Análisis de los sistemas de transporte," *Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México*, 2007.
- [35] "Understanding global warming potential and other greenhouse gas emission metrics." *NGVAME-RICa*, 2018.
- [36] M. Mete, "Valor actual neto y tasa de retorno: Su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión," *Instituto de Investigación en Ciencias Económicas y Financieras. Universidad La Salle, Bolivia.*, 2014.

- [37] W. Andía, “Indicador de rentabilidad de proyectos: el valor actual neto (van) o el valor económico agregado (eva),” *Industrial Data*, 2011. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81622582003>
- [38] N. Scata and M. Podmoguilnye, “El costo total del propietario (total cost ownership),” *XLII Congreso Argentino de Profesores Universitarios de Costos*, 2020.
- [39] “Recorridos del servicio del tren,” ARESEP, Tech. Rep., 2019.
- [40] “Istituto Costarricense de Ferrocarriles INCOFER,” INCOFER. [Online]. Available: <https://www.incofer.go.cr>
- [41] “Tren urbano pasajeros,” ARESEP, Tech. Rep., 2023.
- [42] “Feve serie 2400 librea original,” 2022. [Online]. Available: <https://vapor3d.punchinout.net/feve2400.html>
- [43] “Características técnicas-material motor-feve 2400.” 2020. [Online]. Available: <https://www.listadotren.es/carac/fichadatos.php?id=50>
- [44] Renfe, “Feve-serie utde-2400.” [Online]. Available: <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/utde-2400>
- [45] “Tipos de trenes en españa,” 2008. [Online]. Available: [http://www.camfergal.info/documentos/camfergal\\_23/cfg\\_233.pdf](http://www.camfergal.info/documentos/camfergal_23/cfg_233.pdf)
- [46] *Material de capacitación DMUS para Costa Rica*. CRRC Qingdao Sifang Co.,Ltd., 2020, vol. 1.
- [47] SIEMENS, “Avenio-fits your city.” [Online]. Available: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/trams-and-light-rail/avenio.html>
- [48] “Avenio GTA8 nuremberg, germany,” *Siemens Mobility GmbH*.
- [49] “Avenio copenhagen, denmark,” *Siemens Mobility GmbH*.
- [50] “Avenio munich, germany,” *Siemens Mobility GmbH*.
- [51] “Avenio bremen, germany,” *Siemens Mobility GmbH*.
- [52] “A transformational step for Alstom: completion of the acquisition of Bombardier Transportation.” *Alstom*, 2021.
- [53] “FLEXITY TRAM Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025,” *Alstom*, 2022.
- [54] “FLEXITY Swift, Rotterdam, the Netherlands,” *Bombardier*, 2008. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/41742586/pdf-download-flexity-2-bombardier>
- [55] “FLEXITY Outlook, Geneva, Switzerland,” *Bombardier*, 2008.
- [56] “FLEXITY 2 tram, Blackpool, United Kingdom,” *Bombardier*, 2009. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/35240166/flexity-2-tram-flexity-2-bombardier>
- [57] “FLEXITY Classic, Krakow, Poland,” *Bombardier*, 2011. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/49530382/pdf-download-flexity-2-bombardier>
- [58] “Citadis Dualis,” *Alstom*, 2010. [Online]. Available: [https://www.letbaner.dk/docs/Faktaark\\_ALSTOM-Citadis-Dualis.pdf?fbclid=IwAR2gBB60tGzeS3qZESbHrY4358QMaHJ08YOvywUQND0Qz4SLOiGdGm7J-8I](https://www.letbaner.dk/docs/Faktaark_ALSTOM-Citadis-Dualis.pdf?fbclid=IwAR2gBB60tGzeS3qZESbHrY4358QMaHJ08YOvywUQND0Qz4SLOiGdGm7J-8I)

- [59] “Regio citadis für kassel und die region,” *Alstom*, 2004. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/53631810/regio-citadis-fur-kassel-und-die-region>
- [60] “Tram-Train citadis dualis,” *Alstom*, s.f. [Online]. Available: [https://www.j-trec.co.jp/alstom/CitadisDualis\\_leaflet.pdf](https://www.j-trec.co.jp/alstom/CitadisDualis_leaflet.pdf)
- [61] “Trams and LRV,” *MiiRA Motion and Intelligence in Railways*, 2023. [Online]. Available: [https://www.cafmiira.com/wp-content/uploads/2023/12/LRV-TRAMS\\_solutions.pdf](https://www.cafmiira.com/wp-content/uploads/2023/12/LRV-TRAMS_solutions.pdf)
- [62] “URBOS 100 for the city of Kaohsiung,” *CAF*, 2015. [Online]. Available: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/80aa3ee9-30d9-400a-8415-f10d99d8f258/Data>
- [63] “URBOS for the city of OSLO,” *CAF*, 2022. [Online]. Available: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/7bdd1f8f-d7df-4d2b-4b13-08db6662f270/Data>
- [64] “Parque de tranvías y metros ligeros.” *Vía Libre*, 2011.
- [65] “Citylink,” *Stadler*. [Online]. Available: <https://stadlerrail.com/es/productos/detail-all/citylink/167/>
- [66] “Citylink tren-tram, Verkehrsverbund Mittelsachsen (VMS), Chemnitz, Alemania,” *Stadler*, s.f. [Online]. Available: <https://stadlerrail.com/media/pdf/ttvms0116s.pdf>
- [67] “Citylink vehículo ligero de piso bajo, Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) y Albtal-Verkehrsgesellschaft (AVG), Alemania,” *Stadler*, s.f. [Online]. Available: [https://stadlerrail.com/media/pdf/lrvbkavg16\\_es.pdf](https://stadlerrail.com/media/pdf/lrvbkavg16_es.pdf)
- [68] “Citylink tren-tram Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, Alicante L9, España,” *Stadler*, s.f. [Online]. Available: [https://stadlerrail.com/media/pdf/cttfgvl90420\\_es.pdf](https://stadlerrail.com/media/pdf/cttfgvl90420_es.pdf)
- [69] C. Dellard, “Transport for Wales Rail Ltd CVL Vehicle Change proposal: Class 398,” *Transport for Wales*, 2023.
- [70] “S70 Low-Floor Light Rail Vehicle Minneapolis/St. Paul, Minnesota,” *Siemens Industry*, 2018. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8bdeb615058534866abb0890338b4cfcc1110406/twin-cities-s70-data-sheet.pdf>
- [71] “S70 Low-Floor Light Rail Vehicle Portland, Oregon,” *Siemens Industry*, 2018. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9a185a1e0da027446d67bb4b07876b6477aeec62/portland-s70-data-sheet.pdf>
- [72] “S70 Streetcar Atlanta, Georgia,” *Siemens Industry*, 2018. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:84a2a884b764be46b8410cd8ab45d52bca0deda8/atlanta-s70-data-sheet.pdf>
- [73] “Light rail vehicles for North America,” *Siemens*. [Online]. Available: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/trams-and-light-rail/light-rail-vehicles-north-america.html>
- [74] “Nuremberg orders four-section Avenio LRVs,” *International Railway Journal*, 2019. [Online]. Available: <https://www.railjournal.com/fleet/nuremberg-orders-four-section-avenio-lrvs/>
- [75] “Siemens Mobility builds 73 trams for Munich,” *Siemens Mobility*, 2019. [Online]. Available: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-mobility-builds-73-trams-munich>
- [76] “Bremen: The first Siemens Avenio has arrived!” *Editorial | UTM*, 2020. [Online]. Available: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/bremen-the-first-siemens-avenio-has-arrived/>
- [77] “Bombardier Flexity Light Rail Vehicles (LRVs),” *Railway Technology*, 2014. [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/projects/bombardier-flexity-light-rail-vehicles/?cf-view>

- [78] A. Grantham, “Flexity 2 tram unveiled in Blackpool,” *Metro Report International*, 2011. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/light-rail-and-tram/flexity-2-tram-unveiled-in-blackpool/36257.article>
- [79] “Bombardier Wins Contract for 24 Low-Floor FLEXITY Classic Trams in Krakow,” *Intelligent Transport*, 2010. [Online]. Available: <https://www.intelligenttransport.com/transport-news/371/bombardier-wins-contract-for-24-low-floor-flexity-classic-trams-in-krakow/>
- [80] “Alstom to supply 32 additional Citadis Dualis tram-trains to Île-de-France Mobilités and SNCF,” *Alstom*, 2018. [Online]. Available: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2018/4/alstom-to-supply-32-additional-citadis-dualis-tram-trains-to-ile-de-france-mobilites-and-sncf>
- [81] “Kassel Tram Trains, Railway Extension Project in Germany,” *Railway Technology*, 2007. [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/projects/kasseltramtrains/?cf-view>
- [82] “CAF tram for Oslo unveiled,” *Metro Report International*, 2020. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/vehicles/caf-tram-for-oslo-unveiled/57568.article>
- [83] “Metro de Sevilla cierra la compra de cuatro trenes por 9,5 millones para elevar un 25
- [84] C. J. Castillo, “Renovar los tranvías comprados por 12 millones en 2008 costará otros 15,” *Diario de Sevilla*, 2010. [Online]. Available: [https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Renovar-tranvias-comprados-millones-costara\\_0\\_342266085.html](https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Renovar-tranvias-comprados-millones-costara_0_342266085.html)
- [85] “Presentado el tren-tram híbrido de Stadler para la ciudad alemana de Chemnitz,” *Vía Libre*, 2016. [Online]. Available: <https://vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=20637>
- [86] “CITYLINKs For VDV-Tram-Train Consortium,” *Railvolution*, 2022. [Online]. Available: <https://www.railvolution.net/news/citylinks-for-vdv-tram-train-consortium>
- [87] D. Martínez, “Así son los nuevos trenes que fabricará Stadler en Albuixech para la Línea 9 del Tram,” *alicanteplaza*, 2022. [Online]. Available: <https://alicanteplaza.es/asi-son-los-nuevos-trenes-que-fabricara-stadler-en-albuixech-para-la-linea-9-del-tram>
- [88] K. Barrow, “More Siemens S70 LRVs for Minneapolis,” *International Railway Journal*, 2016. [Online]. Available: <https://www.railjournal.com/regions/north-america/more-siemens-s70-lrvs-for-minneapolis/>
- [89] T. Tung, “Siemens rolls out light rail in US,” *Vietnam Investment Review*, 2012. [Online]. Available: <https://vir.com.vn/siemens-rolls-out-light-rail-in-us-14118.html>
- [90] “Atlanta orders Siemens Avanto streetcars,” *Railway Gazette International*, 2011. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/atlanta-orders-siemens-avanto-streetcars/35943.article>
- [91] L. Castro, I. Moya, and G. Picado, “Trazado general y puntos de referencia del tren interurbano en Costa Rica.” *L.C.R. Logística S.A.*, Tech. Rep., 2016.
- [92] “Google earth,” <https://earth.google.com>, 2024, accessed: 2024-09-18.
- [93] “Estudio informativo de la “electrificación de la Línea bobadilla – algeciras, tramo bobadilla – ronda”: Estudio de potencia, anejo 07,” *Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible*. [Online]. Available: [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudios\\_en\\_tramites/boadilla-ronda/anejo\\_n\\_07\\_estudio\\_de\\_potencia.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudios_en_tramites/boadilla-ronda/anejo_n_07_estudio_de_potencia.pdf)
- [94] “Provisión, instalación y asistencia a la puesta en servicio del sistema de tranvía Cuatro Ríos de Cuenca,” *Cuenca Municipalidad*. [Online]. Available: <https://www.cuenca.gob.ec/system/files/4-TOMO%20IV%20cita.PDF>

- [95] “Rail baltica – project of the century,” <https://www.railbaltica.org/about-rail-baltica/>.
- [96] “Railway Energy, Part 1: Traction power System,” *Rail Baltica*, 2022.
- [97] “Avenio Tram-The Hangué, Netherlands,” *Siemens*, 2014. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d08bfc2a-0f91-46e7-9b37-abafb2b6438b/product-specification-avenio-e.pdf>
- [98] “Estudios de Factibilidad Técnica, Económico-Financiera, Ambiental, Social y de vulnerabilidad para la Construcción, Equipamiento, Puesta en marcha, Operación y Mantenimiento, bajo la modalidad de Concesión de Obra con Servicio Público, del Sistema de Tren Rápido de Pasajeros (TRP) en la Gran Área Metropolitana (GAM): Memoria 17 - Electrificación y Catenaria.” *INCOFER IDOM*, 2018.
- [99] “Reglamento de Vida Máxima Autorizada para las Unidades de Transporte Colectivo Remunerado de Personas y Servicios Especiales: N° 29743-MOPT,” Gobierno de Costa Rica, 2021, disponible en: [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=47050#ddown](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=47050#ddown).
- [100] D. Canales, “Trenes apolo costarán 2 millones de euros,” <https://www.larepublica.net/noticia/tren-es-apollo-costaran-2-millones-de-euros>, 2008.
- [101] “Informe I trimestre estadísticas 2017,” *INCOFER*, 2017.
- [102] M. H. Segura, “Informe de estadísticas operativas II semestre 2018,” *INCOFER*, 2019.
- [103] “Informe de estadísticas operativas II semestre 2019,” *INCOFER*, 2019.
- [104] “Informe de estadísticas operativas enero a diciembre 2021,” *INCOFER*, 2021.
- [105] “¿Qué son los costos de mantenimiento y sus implicaciones para la empresa?” <https://www.fractal.com/es/guias-mantenimiento/costos-de-mantenimiento>, Fractal.
- [106] “COSFER: Modelo de Estimación de Costos Ferroviarios de Carga,” *Ministerio de Transporte Presidencia de la Nación, Argentina*, 2019.
- [107] “3.4.6 Costes y precios en el transporte ferroviario,” Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Gobierno de España, 2022, disponible en: <https://otle.transportes.gob.es/inform/es/2022/3competitividad/34precios-y-costes/346costes-y-precios-en-el-transporteferoviario>.
- [108] P. G. Suárez, “El deterioro del valor de los activos,” *Revista de Contabilidad y Dirección*, 2015.
- [109] “Evolución anual de la tasa de inflación en Costa Rica desde 2015 hasta 2029,” <https://es.statista.com/estadisticas/1190003/tasa-de-inflacion-costa-rica/#:~:text=Por%20lo%20general%2C%20la%20tasa,una%20cifra%20menos%20al%201%25.>, Statista, 2024.
- [110] *Directriz CN-001-2009*, Ministerio de Hacienda Pública, 2009, disponible en: [https://www.hacienda.go.cr/docs/Directriz\\_CN-001-2009\\_Valoracion\\_y\\_Depreciac\\_de\\_Propiedad\\_Planta\\_y\\_Equipo.pdf](https://www.hacienda.go.cr/docs/Directriz_CN-001-2009_Valoracion_y_Depreciac_de_Propiedad_Planta_y_Equipo.pdf),.
- [111] A. M.-G. ang J. Merkisz, M. Jacyna, D. Pyza, and H. Stawecka, “Rail vehicles recycling,” <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CR14/CR14035FU1.pdf>, WIT Transactions on The Built Environment, 2014.
- [112] “Porcentaje de depreciaciones de activos fijos de acuerdo a su tipo,” <https://htk-id.com/porcentaje-de-depreciaciones-de-activos-fijos-de-acuerdo-a-su-tipo/>, HTK Identificación Inteligente.

- [113] “Conectarán cuatro ciudades: Así son los trenes que Costa Rica recibirá de China en noviembre,” <https://www.prensalibre.com/economia/conectaran-cuatro-ciudades-asi-son-los-trenes-que-costa-rica-recibira-de-china-en-noviembre/>, Prensa Libre, 2020.
- [114] “Precios sociales en costa rica,” <https://www.mideplan.go.cr/precios-sociales>, Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica., 2024.
- [115] “15 CAF trams for new line extensions in Marseille,” <https://www.urban-transport-magazine.com/en/15-new-caf-trams-for-new-lines-in-marseille/>, Urban Transport Magazine, 2022.
- [116] “Environmental Product Declaration according to ISO 14025 Type III,” *SIEMENS*, 2022. [Online]. Available: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/060720c0-ce5c-4a6d-86a7-08db523a4d9e/Data>
- [117] “Grupo ICE,” <https://www.urban-transport-magazine.com/en/15-new-caf-trams-for-new-lines-in-marseille/>, 2024.
- [118] “Plan de expansión de la generación eléctrica 2022-2040.” *Instituto Costarricense de Electricidad.*, 2023.
- [119] “Datos estadísticos anuales de importación,” <https://www.recope.go.cr/productos/estadisticas-de-importacion/>, Refinadora Costarricense de petróleo (RECOPE), 2024.
- [120] “Informe de estadísticas operativas enero a diciembre 2023,” *INCOFER*, 2023.
- [121] “Factores de emisión de gases de efecto invernadero,” Ministerio de Ambiente y Energía (MINA) e Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024.
- [122] “Global Warming Potentials (GWPs)/CO<sub>2</sub>-equivalent (CO<sub>2</sub>e) and the importance of time horizons.” *Environmental Defense Fund*. [Online]. Available: [https://www.edf.org/sites/default/files/content/emission\\_equivalency\\_tool\\_documentation\\_methodology\\_23062022.pdf](https://www.edf.org/sites/default/files/content/emission_equivalency_tool_documentation_methodology_23062022.pdf)
- [123] N. C. Zúñiga and A. R. Ramírez, “Evaluación del impacto sonoro del tren urbano y sus implicaciones sociales: análisis del tramo San José – Tres Ríos,” *Tecnología en Marcha*, 2024.
- [124] *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment*. World Health Organization (WHO), 2022.
- [125] “Factores de emisión de gases de efecto invernadero,” *Instituto Meteorológico Nacional (IMN)*, 2022.
- [126] J. Hoecker and S. Griffith, “Rail Electrification in North America: Benefits and Barriers.” *Rail Electrification Council of NEMA*.
- [127] V. G. Soto, A. de la Peña Flores, and K. G. Bermúdez, “Desarrollo económico, inversión en transporte y urbanización en México: causalidad y efectos,” *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales*, 2023.

## Apéndices.

### Apéndice I. Mapa de las rutas en Google Earth.

Estas rutas fueron realizadas por medio de la aplicación de escritorio de Google Earth Pro, para ello, se fueron colocando diferentes puntos al azar en la ruta de la línea férrea, de manera manual. Se realizaron las tres rutas por separado.



Fig. 42. Mapa de las rutas del tren rápido de pasajeros [92].

### Apéndice II. Suavización de perfil de elevación.

Para la suavización del perfil de elevación de cada una de las 3 rutas se utilizó la aplicación de Excel QM, en su capítulo *Forecasting* y su operación *Trend adjusted exponential smoothing*, utilizando un Alpha de 0,3 y un Beta de 0,3 igualmente, para que la curva sea lo más suavizada posible.

A continuación, se muestra un ejemplo de los resultados en la subestación SE1-A de San José-Alajuela a partir de los datos calculados en el Excel QM.

Tabla I: Ejemplo del resultado del suavizamiento de curvas en la ruta de San José-Alajuela.

Subestación	Puntos	Altura (m)	Altura suavizada (m)
<b>SE1-A</b>	1	1180,6	1180,60
	2	1179,4	1180,60
	3	1179	1180,13
	4	1177,5	1179,58
	5	1172,9	1178,56
	6	1173,4	1175,96
	7	1173,7	1174,05
	8	1176,8	1172,78
	9	1175,2	1173,18
	10	1165,6	1173,16
	11	1161,8	1169,59
	12	1177,4	1165,25
	13	1165,9	1167,98
	14	1166,1	1166,26
	15	1174,2	1165,10
	16	1174,1	1167,53
	17	1171,6	1169,80
	18	1160	1170,80
	19	1157,2	1167,05
	20	1155,9	1162,69
	21	1155,5	1158,64
	22	1149,3	1155,41
	23	1147,2	1150,73
	24	1150	1146,51
	25	1147,8	1144,71
	26	1145,7	1143,07
	27	1145,1	1141,53
	28	1144,7	1140,59
	29	1144,4	1140,18
	30	1142,9	1140,19
	31	1141,8	1139,98
	32	1138,6	1139,68
	33	1134	1138,40
	34	1130,9	1135,74
	35	1131	1132,50
	36	1133,3	1130,14
	37	1133,8	1129,45
	38	1136,3	1129,52
	39	1136,7	1130,92
	40	1139,8	1132,54
	41	1142,1	1135,26
	42	1143,2	1138,47
	43	1143,8	1141,47
	44	1146,4	1143,96
	45	1146,9	1146,71

### Apéndice III. Cálculo de la resistencia general de avance.

Para el siguiente cálculo, se consideró una velocidad promedio del tren eléctrico ligero de 40 km/h.

$$R_a(kg \cdot t) = 1,005 + 0,018 \cdot 40 + 0,00136 \cdot 40^2$$

Esto dio como resultado:

$$R_a = 3,901kg \cdot t$$

Finalmente, se multiplicó el resultado anterior por la cantidad de toneladas máxima del tren que son aproximadamente 63 t, y luego se hizo la conversión a Newton.

$$R_a(N) = 3,901 \cdot 63 \cdot 9,8$$

$$R_a = 2408,48N$$

### Apéndice IV. Cálculo de la resistencia a pendientes.

En la siguiente ecuación se muestra cómo se realizó el cálculo de la fuerza de resistencia a pendientes de los trenes eléctricos, con una masa del tren eléctrico ligero promedio de 63 toneladas, contando el peso de los pasajeros.

$$F_p(daN) = m \cdot 9,81 \cdot i \cdot \sin(\alpha)$$

Donde:

- m es la masa del tren en toneladas.
- i es la pendiente en mm/m.
- $\alpha$  es el ángulo de la pendiente.

### Apéndice V. Cálculo de la potencia.

Para cada una de las rutas se utilizó una masa promedio del tren eléctrico ligero de 63 toneladas, y una velocidad promedio de 40 km/h. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$P(kW) = F_t \cdot V$$

Donde:

- $F_t$  es la fuerza total de la resistencia al avance y la resistencia a pendientes.
- V es la velocidad del tren en m/s, donde se convirtió la velocidad de km/h.

## Apéndice VI. Tablas del resumen de la fuerzas requeridas en cada una de las rutas.

Tabla II: Resumen de las fuerzas por subestación preliminar de la ruta San José-Alajuela.

Subestación	Resistencia a rampas (N)	Resistencia general de avance (N)	Resistencia total (N)	Fuerza requerida (N)
S/E1-A	22377,23	2408,48	24785,71	100385,71
S/E2-A	29809,34		32217,81	107817,81
S/E3-A	3265,89		5674,37	81274,37
S/E4-A	37893,78		40302,26	115902,26
S/E5-A	8504,66		10913,14	86513,14
S/E6-A	38142,01		40550,49	116150,49
S/E7-A	20265,19		22673,67	98273,67

Tabla III: Resumen de las fuerzas por subestación preliminar de la ruta San José-Belén.

Subestación	Resistencia a rampas (N)	Resistencia general de avance (N)	Resistencia total (N)	Fuerza requerida (N)
S/E1-B	13641,91	2408,48	16050,38	91650,38
S/E2-B	1435,22		3843,70	79443,70
S/E3-B	34458,48		36866,96	112466,96
S/E4-B	34020,51		36428,99	112028,99
S/E5-B	7659,41		10067,89	85667,89
S/E6-B	17129,47		19537,95	95137,95

Tabla IV: Resumen de las fuerzas por subestación preliminar de la ruta San José-Cartago.

Subestación	Resistencia a rampas (N)	Resistencia general de avance (N)	Resistencia total (N)	Fuerza requerida (N)
SE1-C	3221,65	2408,48	5630,13	81230,13
SE2-C	14322,00		16730,48	92330,48
SE3-C	16914,08		19322,56	94922,56
SE4-C	20308,36		22716,84	98316,84
SE5-C	11891,20		14299,68	89899,68
SE6-C	1331,17		3739,64	79339,64
SE7-C	346,75		2755,22	78355,22

## Apéndice VII. Ecuación del costo del ciclo de vida.

Para el cálculo del costo del ciclo de vida en cada uno de los trenes se utilizó la siguiente fórmula:

$$CCV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (8)$$

Donde:

- CCV es el Costo del Ciclo de Vida.

- $C_t$  es el costo en el año  $t$ .
- $r$  es la tasa de descuento.
- $t$  es el año en que ocurre el costo (de 0 a  $n$ )
- $n$  es el número total de años en el ciclo de vida.