

Instituto Costarricense de Electricidad

Gerencia de Electricidad



Proyecto Piloto de Buses Eléctricos

Fase 3: Operación ruta Alajuela - Heredia - San José

Resumen de resultados generales

Julio 2022

Contenido

1-	Descripción de la ruta.....	4
2-	Unidades utilizadas	5
3-	Periodo de pruebas y plan de operación diario	6
4-	Resultados	7
4.1	Estadísticas generales de la operación.....	7
4.2	Rendimiento de los buses eléctricos.....	8
4.3	Recarga de los buses	11
4.4	Cuantificación de beneficios de operación de buses eléctricos.....	12
5-	Conclusiones.....	15
6-	Pasos siguientes	16

Introducción

El presente informe se generó en el marco del Proyecto Piloto de buses eléctricos que se gestó a partir de la donación de tres buses eléctricos por parte del Gobierno de Alemania al Gobierno de Costa Rica, y que se diseñó a través de la colaboración de instituciones públicas y entes de cooperación internacional que se unieron para formar el Comité para la Electrificación del Transporte Público (CETP), el cual es coordinado por el Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE). Entre las instituciones participantes se encuentran el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) y el Grupo ICE, además de entes cooperantes como la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ), ONU Medio Ambiente y la Fundación CRUSA.

El proyecto consiste en la operación de dos buses eléctricos en tres rutas de transporte público. Cada una de estas operaciones se considera una fase del proyecto individual.

La primera fase del proyecto se ejecutó en la ruta 70, ramal San José - Desamparados - San Rafael, entre febrero y junio de 2021. Posteriormente, se ejecutó la fase 2 del proyecto en la ruta 200, ramal Alajuela – San José por INVU, entre agosto 2021 y febrero 2022.

El presente informe corresponde a la fase 3 del proyecto, que se ejecutó entre abril 2022 y junio 2022 en la ruta 200, ramal Alajuela – San José por Heredia.

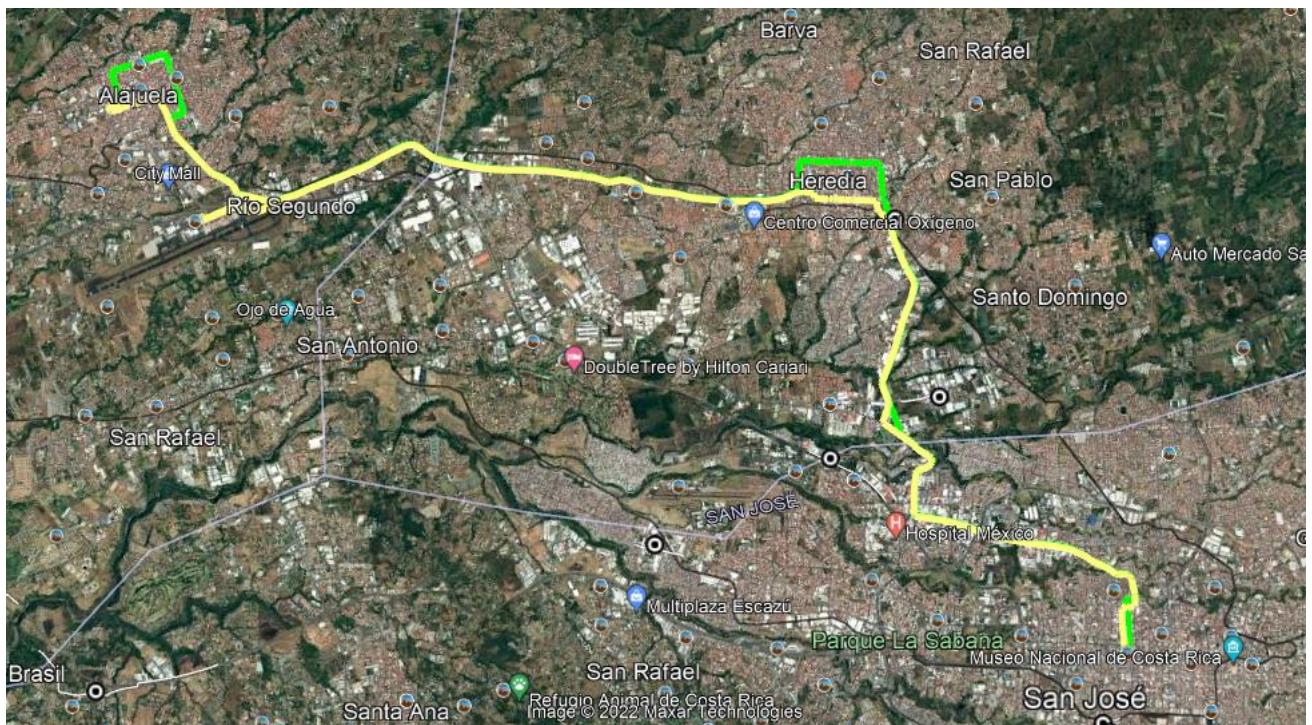
El bus adicional que no está operando en estas fases del piloto, se mantuvo en el ICE para cumplir funciones de respaldo (en caso de que alguno de los otros dos buses sufra un percance) y para ejecutar pruebas y actividades adicionales al proyecto.

Proyecto Piloto de Buses Eléctricos

Fase 3: Operación ruta 200, ramal Alajuela – San José por Heredia

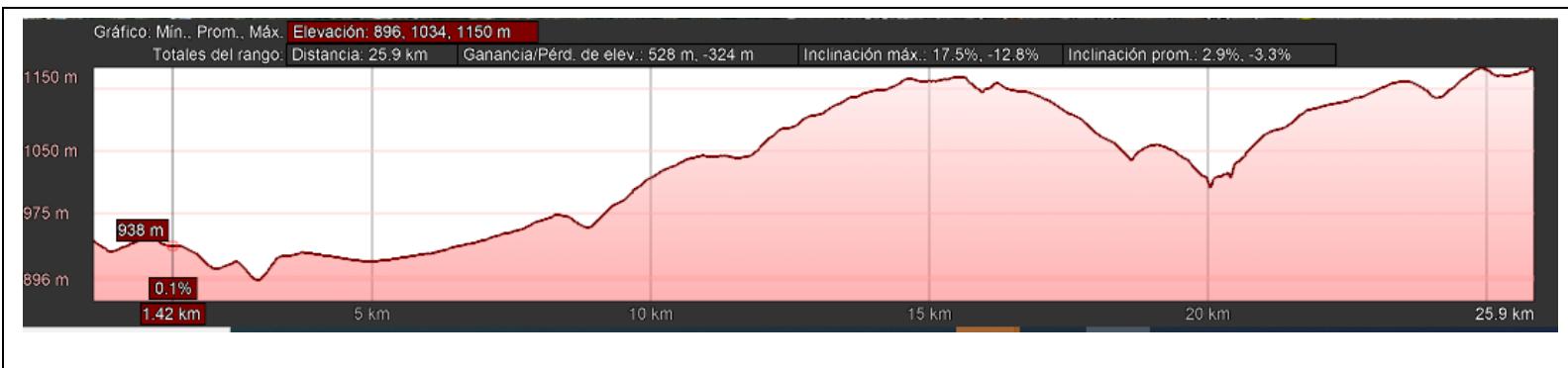
1- Descripción de la ruta

La ruta 200 es operada por la empresa TUASA. Según información brindada por la empresa, el ramal Alajuela – San José por Heredia comprende una distancia de aproximadamente 27,8 kilómetros en el sentido San José - Alajuela, y de 25,5 kilómetros en el sentido Alajuela San José, para un total aproximado de 53,3 kilómetros. En las figuras 1 y 2 se muestra el recorrido del ramal y su perfil de elevación.



Fuente: TUASA.

Figura 1. Recorrido de la ruta Alajuela – San José por Heredia



Fuente: Google Earth.

Figura 2. Perfil de elevación para la ruta Alajuela – San José por Heredia (a la izquierda Alajuela).

Según el perfil anterior, este ramal presenta un cambio total de elevación de aproximadamente 200 metros entre Alajuela y San José.

Según información de TUASA, la operación en el ramal se da entre 4 a.m. y 11 p.m., y la duración del recorrido varía durante el día, con una duración por sentido de aproximadamente 50 minutos entre 4 a.m. y 5 a.m., mientras que en el horario de 6 a.m. a 2 p.m. se pueden dar duraciones de entre 1 hora y 1 hora con 40 minutos por sentido, y por otra parte se pueden esperar duraciones de hasta 2 horas en el horario de 6 p.m. a 8 p.m.

Los buses en este ramal realizan aproximadamente 5 vueltas completas al día, y son operados por 2 conductores.

Este ramal presenta condiciones típicas de ruta urbana con alto congestionamiento vial, pues incluye a las cabeceras de las provincias de San José, Heredia y Alajuela, además de puntos conocidos por alta flujo vehicular como Heredia y la Uruca. Esto representa una oportunidad para probar el comportamiento de los buses en condiciones diferentes a las que se tuvieron en las fases 1 y 2 del piloto de buses eléctricos.

2- Unidades utilizadas

Las unidades eléctricas que su utilizaron en las pruebas son las denominadas para efectos del plan piloto como E1 y E2 (la unidad E3 permanece como unidad de reserva de respaldo en el ICE), que corresponden a buses de la marca BYD. Además, cada unidad eléctrica circula en carreras contiguas con sus respectivos buses “espejo” que utilizan diésel como combustible, designados como 101 y 102 respectivamente.

En la tabla 1 se resumen y se comparan las características de los buses diésel y los buses eléctricos utilizados, según información brindada por la empresa TUASA en el caso de las unidades diésel y por el fabricante BYD para los eléctricos.

Tabla 1: características de buses utilizados en las pruebas

Parámetro	Buses eléctricos	Buses diésel
Marca de motor y carrocerías	BYD	MAN RR8/ King Long Bus
Potencia	2 x 150 kW (potencia pico)	208 kW
Capacidad de batería	276 KWh	N/A
Combustible	100 % eléctrico	diésel, cumple con la norma EURO VI
Año modelo	2020	2016
Peso neto vacío	12.8 toneladas.	12.5 toneladas.
Peso total con carga	18.5 toneladas.	19 toneladas.
Transmisión	automática.	caja zf automática.
Largo	12 metros	13.20 metros
Cantidad de asientos	32	55

Fuente: TUASA y BYD

Es importante resaltar la diferencia en cuanto a tamaño y capacidad de asientos de los buses diésel y los eléctricos, ya que con las restricciones (debidas a la pandemia) que existieron en una parte del periodo de las pruebas, los buses solamente pueden llevar personas sentadas y máximo 10 personas de pie, por lo que el bus diésel de forma comparativa tiene la posibilidad de llevar una cantidad mayor de pasajeros. Este factor incide en el peso y por ende puede generar un ligero aumento adicional de consumo en el bus diésel respecto al bus eléctrico.

3- Periodo de pruebas y plan de operación diario

Las pruebas en la fase 3 del proyecto piloto se pactaron para un periodo de 2.5 meses y se extendieron desde el 1 de abril hasta el 11 de junio de 2022.

Esta fase del piloto tuvo una duración menor al tiempo original que se había pactado de 4 meses para cada ruta, debido a que las pólizas de seguro con que contaban los buses estaban vigentes hasta el 13 de junio, y no fue posible extender el plazo de vigencia.

Para establecer el plan de operación, se realizaron pruebas previas en el ramal durante los días 30 y 31 de marzo de 2022, mediante las cuales se determinó que la cantidad máxima de vueltas completas que pueden ejecutar los buses eléctricos utilizados en el piloto es de **3** para este caso en específico. Este número se determinó para asegurar un estado de carga de la batería (SOC) que sea siempre mayor a 20% y atender así las recomendaciones del fabricante de los buses para extender la vida útil de las baterías.

El plan de operación diario comprende entonces la consecución de 3 vueltas completas al ramal Alajuela – San José por Heredia, lo cual implica una distancia diaria teórica de alrededor de 160 kilómetros.

Se acordó con la empresa TUASA que las tres vueltas completas que realizarían los buses durante el día se distribuirían en los horarios que presentan diferencias en cuanto a duración de las carreras debido a condiciones de tráfico en la ruta, incluyendo así horas pico y valle. De esta manera, se realizaría una primera carrera en tempranas horas de la mañana (entre 5 a.m. y 6 a.m.), la siguiente en horas cercanas al medio día, y la última se ejecutaría hacia el final de la tarde.

Es importante aclarar que el número de carreras que pueden ejecutar los buses eléctricos está ligado a sus características específicas, principalmente el tamaño del banco de baterías, y no se deben extrapolrar los resultados obtenidos en estas pruebas a otros buses eléctricos con capacidades diferentes, pues algunos podrán realizar más o menos recorridos en función de sus características.

4- Resultados

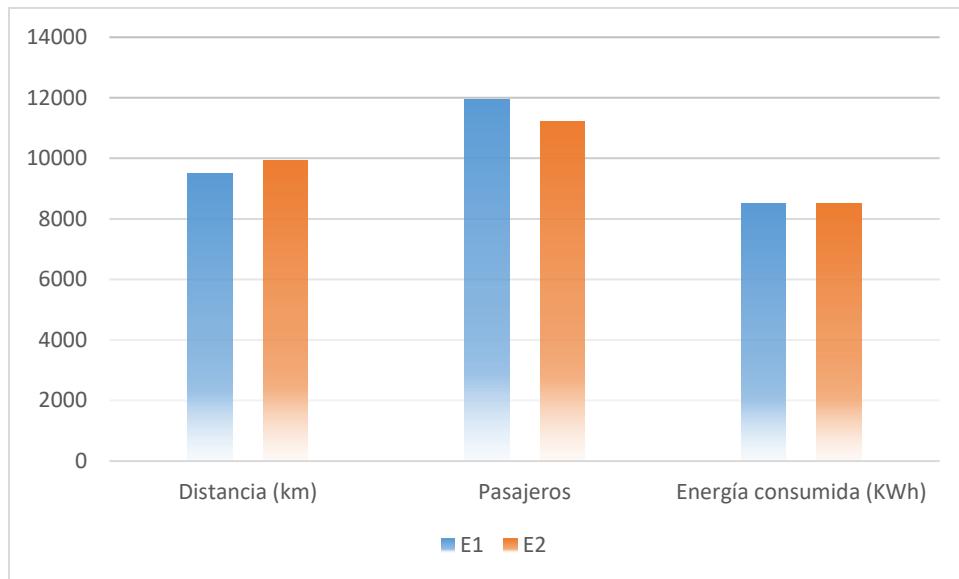
4.1 Estadísticas generales de la operación

Como se muestra en la figura 3, al final de la operación de la fase 3 del proyecto piloto de buses, con los buses E1 y E2 se recorrieron más de 19 mil kilómetros, se transportaron más de 23 mil personas, y se han consumido aproximadamente 17 mil kWh de energía durante las recargas de las unidades.



Figura 3. Totales de kilometraje, pasajeros y energía consumida por los buses eléctricos E1 y E2 en la fase 3 del proyecto piloto de buses eléctricos

En la gráfica 1 se muestran los resultados desglosados por cada bus eléctrico, mientras que en la tabla 2 se pueden ver los promedios diarios para cada variable.



Gráfica 1. Estadísticas totales por bus durante la operación en el ramal Alajuela- San José por Heredia

Tabla 2: promedios diarios

Promedios diarios		
Bus	E1	E2
Kilometraje (km)	166,25	167,49
Pasajeros	212,23	191,33
Energía consumida (kWh)	151,00	145,42

En el caso de los kilómetros recorridos, el dato de la tabla 2 incluye los kilómetros en vacío, que son los que recorren los buses para trasladarse desde el plantel hasta la terminal.

4.2 Rendimiento de los buses eléctricos

En la figura 4 se muestran los datos generales de rendimiento promedio para los buses eléctricos en el ramal Alajuela – San José por Heredia. Para esta operación el consumo de energía promedio ha sido de **0,88 kWh/km**, con un promedio diario de disminución del estado de carga de la batería (SOC) de **65,71 %**, o lo que es lo mismo un remanente de batería (SOC) de **34,29 %** (promedio) al final del día típico de operación. Estos valores de rendimiento se obtienen gracias a un porcentaje promedio de regeneración de energía de **41%**.



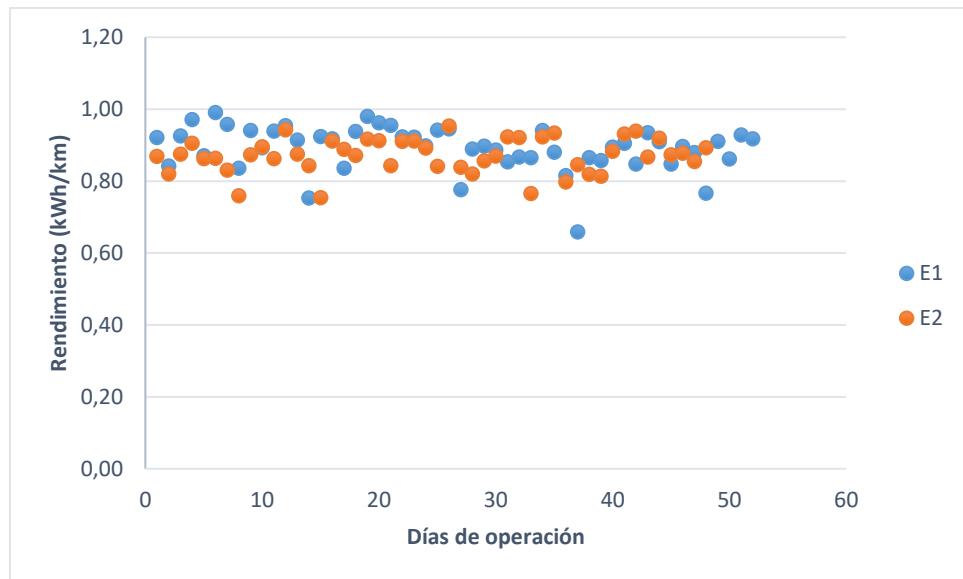
Figura 4. Promedios generales de rendimiento, regeneración y consumo de batería de buses eléctricos en operación San José – Alajuela por Heredia

Es importante indicar que el comportamiento de los parámetros de rendimiento mostrados anteriormente varía a lo largo del tiempo según las condiciones específicas de operación de un periodo determinado, en donde influyen factores como densidad del tráfico, tipo de conducción por parte de los choferes, cantidad de pasajeros (peso), entre otros. Por ejemplo, en la gráfica 2 se puede visualizar el comportamiento diario del índice de consumo de energía que como se aprecia a lo largo de la operación varía en un rango de entre aproximadamente 0,66 kWh/km y 0,99 kWh/km. En la tabla 3 además se puede observar el promedio de rendimiento para cada bus eléctrico.

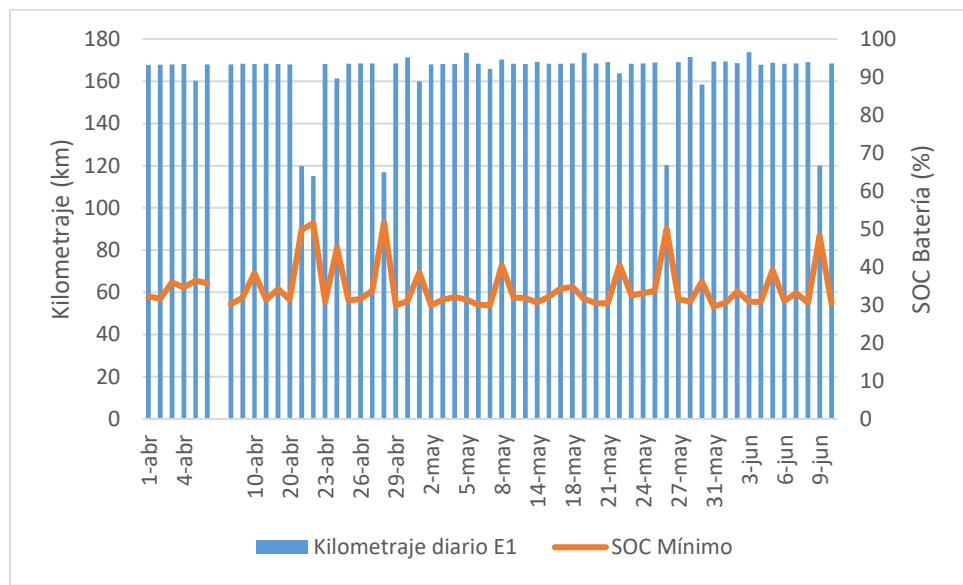
También en las gráficas 3 y 4, se puede observar como varía el consumo de batería en días con kilometrajes similares.

Tabla 3: promedio de rendimiento de los buses eléctricos

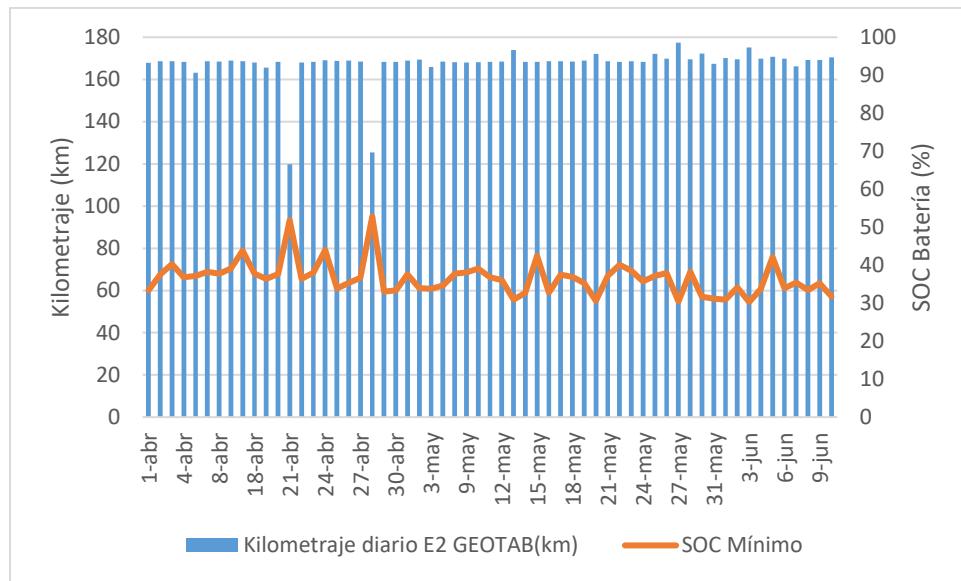
Promedio rendimiento E1	Promedio rendimiento E2
(kWh/km)	(kWh/km)
0,89	0,87



Gráfica 2. Variación del índice de rendimiento diario durante la operación en la ruta San José – Alajuela por Heredia



Gráfica 3. Variación del kilometraje y el porcentaje de carga de la batería para el bus E1 durante la operación en la ruta San José – Alajuela por Heredia



Gráfica 4. Variación del kilometraje y el porcentaje de carga de la batería para el bus E1 durante la operación en la ruta San José – Alajuela por Heredia

Es de suma importancia recalcar que los datos de rendimiento obtenidos en esta operación están relacionados directamente a las condiciones que se presentaron en la ruta, por lo cual deben manejarse con cautela y no deben de extrapolarse de forma directa a otras rutas o bajo otras condiciones sin antes realizar un análisis adecuado de cada situación.

4.3 Recarga de los buses

La recarga de los buses eléctricos se llevó a cabo utilizando los cargadores marca BYD que se han utilizado en las fases 1 y 2 del piloto de buses eléctricos. Estos cargadores son de 80 kW, y funcionan en corriente alterna, siendo una interfaz entre la red eléctrica y el bus. En la figura 5 se muestra el cargador utilizado y su respectiva instalación en la empresa TUASA, cabe aclarar que esta instalación es la misma que se utilizó en la fase 2.



Figura 5. Instalación de cargadores en TUASA

La recarga en esta operación tuvo las siguientes características:

- La recarga se realizó de **noche (por lo general entre 6 p.m. y 12 m.n.)**
- Promedio de energía recargada diario: **148 kWh**
- Promedio de duración de la carga: **1:55 (1 hora y 55 minutos)**

4.4 Cuantificación de beneficios de operación de buses eléctricos

Los beneficios de los buses eléctricos que se cuantificaron en este caso son el ahorro en consumo de energía y la reducción de emisiones. En la figura 6 se muestran los valores promedio de ambas variables, y además en la gráfica 5 se exemplifica el orden de magnitud del costo diario de combustible y electricidad para el bus diésel y el eléctrico respectivamente.

En cuanto a la reducción de emisiones, los cálculos indican que se ha reducido un **98%** las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual equivale en este caso a un total de **24,29 tCO₂e**.

La cantidad de litros de combustible consumida en las carreras analizadas para efectos de estimación de ahorros fue de aproximadamente **8328 litros** entre ambos buses.

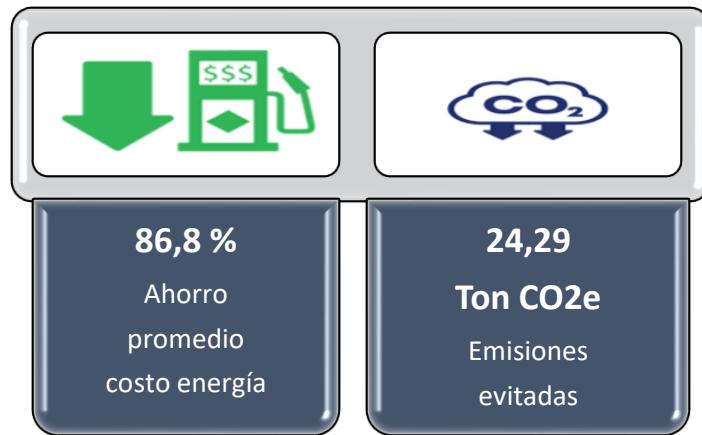
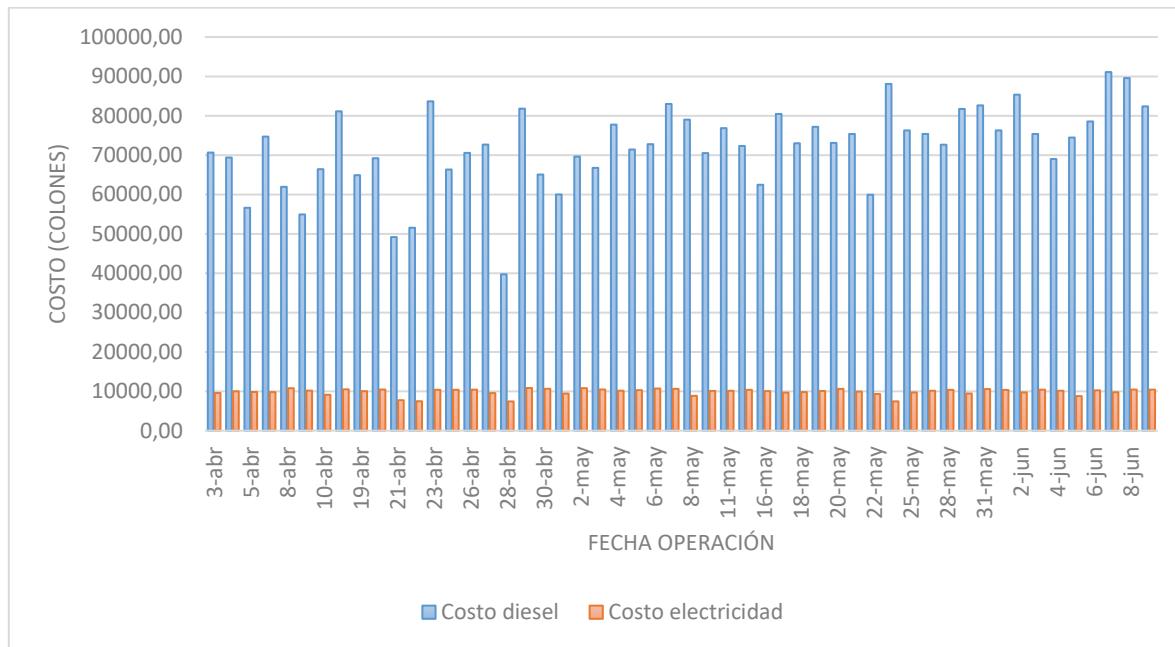


Figura 6. Promedios generales de porcentaje de ahorro en costo de energía y emisiones de CO₂ evitadas en la operación del ramal Alajuela-San José por Heredia



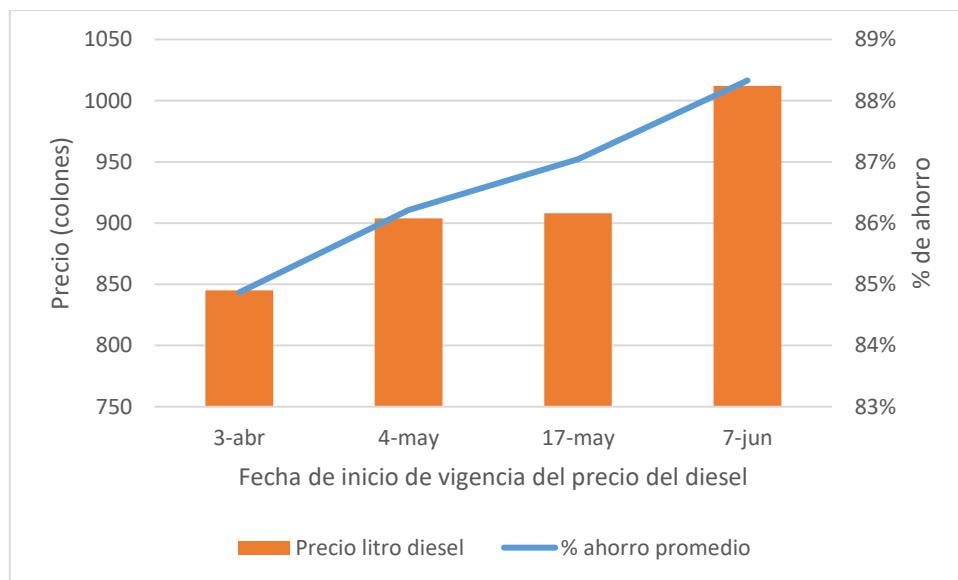
Gráfica 5. Orden de magnitud del costo de energía eléctrica y diésel en la ruta San José – Alajuela por Heredia para el bus E1 y su bus espejo diésel.

Como referencia adicional, la tabla 4 muestra los promedios diarios de costo de energía y electricidad para los buses eléctricos y sus respectivos buses espejo.

Tabla 4: promedio de costo diario de electricidad y combustible

Promedio costo diario (colones)			
Electricidad bus E1	9890,00	Electricidad bus E2	9297,81
Diésel bus 101 (espejo de E1)	72125,63	Diésel bus 102 (espejo de E2)	75964,31

Un detalle importante, es que el porcentaje de ahorro en combustible está ligado al precio del diésel y de la electricidad, y durante la operación de la fase 3 del piloto de buses eléctricos se tuvieron variaciones importantes en el precio del diésel. Para ejemplificar el efecto del cambio en el precio del diésel, la gráfica 6 muestra la variación del porcentaje de ahorro en combustible según los diferentes aumentos en el precio del diésel para el bus E1 y su bus diésel espejo.



Gráfica 6. Variación del porcentaje de ahorro y el precio del diésel en la ruta San José – Alajuela por Heredia para el bus E1 y su bus espejo diésel.

Para una adecuada comprensión de los datos mostrados en el cálculo de ahorro en combustible y emisiones se debe considerar lo siguiente:

1. Los valores mostrados corresponden a datos promedio de una muestra de **293** carreras, las cuales corresponden a días que se seleccionaron por mostrar datos similares de kilometraje y número de carreras, es decir, son días que muestran una operación comparable entre ambas tecnologías.
2. Se utilizaron los precios vigentes del diésel en estaciones de servicio según ARESEP para cada día estudiado. Este costo cambió a lo largo de la operación, las variaciones en el precio fueron tomadas en cuenta para calcular el ahorro global.

3. El costo de electricidad utilizado corresponde al valor establecido por ARESEP para recarga en planteles de buses, que corresponde a un valor de 57,08 colones/kWh. A este monto se le sumó el impuesto de valor agregado y otros rubros que componen el recibo eléctrico como bomberos, etc.

Otras consideraciones que se deben tomar en cuenta para un adecuado entendimiento de los resultados obtenidos en general son las siguientes consideraciones:

1. En parte del periodo en que se desarrolló la operación de la fase 3, existió la restricción de que solamente podían ir personas sentadas o únicamente 10 personas de pie, esto debido a la pandemia. El efecto en el rendimiento causado por el hecho de que el bus diésel tiene más asientos que el eléctrico, lo cual hace que pueda llevar más personas y por tanto mayor peso se considera por ahora despreciable.
2. La diferencia de antigüedad de las unidades diésel y eléctricas (4 años) puede influir en el porcentaje de ahorro calculado. Se desarrollarán los análisis necesarios para cuantificar el impacto que pueda tener esta influencia, sin embargo, de momento se considera que no es significativo comparado con los demás factores que intervienen en el rendimiento (esto asumiendo que los buses diésel tienen un programa de mantenimiento preventivo adecuado).
3. El resultado de ahorro en combustible y emisiones evitadas fueron obtenidos en condiciones particulares de operación que se tienen en la ruta San José – Alajuela. Es importante tomar estas condiciones en cuenta si se quiere tomar como referencia estos valores para el análisis de otras rutas.

5- Conclusiones

1. Los datos obtenidos demuestran que con buses eléctricos se puede llegar a obtener un ahorro sustancial en la factura de combustible de los operadores que puede llegar hasta un 86,7% del costo de diésel.
2. El porcentaje de ahorro obtenido en la fase 3 es más alto que en las fases 1 y 2, debido al incremento en los precios de los combustibles que se dieron durante esta última operación.
3. Con buses eléctricos se puede reducir en un 98% las emisiones de CO₂ generadas por buses de combustión.
4. Los resultados obtenidos en la fase 3 corresponden a una operación con características específicas de distancia, altimetría, tráfico, choferes, entre otros aspectos, y no deben ser aplicados a otras rutas sin antes realizar un análisis adecuado.

6- Pasos siguientes

Si bien es cierto que la fase 3 del piloto de buses eléctricos corresponde a la fase final del proyecto, es necesario continuar generando información que permita a los tomadores de decisión contar con herramientas más precisas para la futura incorporación de buses eléctricos en la flota de transporte público de Costa Rica. Ante esto, se recomienda continuar trabajando en las siguientes acciones:

1. Ejecución de pruebas de operación de los buses en rutas fuera de la GAM.
2. Cuantificación de otros beneficios como la reducción de costos de mantenimiento y la mejora en la salud ocupacional, para lo cual se debe trabajar en conjunto con la academia, operadores de transporte público y otras instituciones interesadas en la movilidad eléctrica.
3. Análisis de variables que intervienen en el rendimiento de las operaciones ejecutadas, y posibles soluciones para optimizar la operación con buses eléctricos.
4. Conceptualización y valoración de modelos de negocio que faciliten el despliegue de buses eléctricos en Costa Rica.

EQUIPO DE ELABORACIÓN DEL INFORME		
NOMBRE	FIRMA	DEPENDENCIA
REDACCIÓN Gerardo Guadamuz Madrigal		Dirección Gestión de Negocios
REVISIÓN Roberto Quirós Balma		Presidencia Ejecutiva