

Instituto Costarricense de Electricidad

Gerencia de Electricidad

División Distribución y Comercialización



Proyecto Piloto de Buses Eléctricos

Fase 2: Operación ruta Alajuela – San José

Resumen de resultados generales

Marzo 2022

Contenido

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

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, con una duración de 4 meses cada una. Cada una de estas operaciones se considera una fase del proyecto individual.

La primera fase del proyecto se ejecutó en la ruta San José – San Rafael Arriba de Desamparados entre febrero y junio de 2021.

El presente informe corresponde a la fase 2 del proyecto, que se ejecutó entre agosto 2021 y febrero 2022.

El bus adicional que no está operando en estas fases del piloto, se encuentra 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 2: Operación ruta Alajuela – San José

1- Descripción de la ruta

La ruta San José – Alajuela por el INVU, es operada por la empresa TUASA, comprende una distancia por sentido de aproximadamente 21 kilómetros, con una diferencia de altitud de aproximadamente 200 metros entre Alajuela y San José como se aprecia en la figura 1 (cambio total en el desnivel).



Fuente: Google Earth.

Figura 1. Perfil de elevación para la ruta San José – Alajuela

Esta ruta presenta condiciones típicas de ruta urbana en los momentos en que entra a las cabeceras de las provincias de San José y Alajuela. Por otra parte, estas cabeceras se comunican por una autopista en la que es posible alcanzar velocidades altas de circulación que pueden llegar hasta los 80 km/h, ideal para probar el comportamiento de los buses bajo condiciones de baja y mayor velocidad (se debe tomar en cuenta que el autobús lleva una restricción que de máxima velocidad en los 60 km/h).

Durante el periodo de la prueba se han estado realizando trabajos de ampliación de la autopista en varios puntos, lo que ha provocado embotellamientos en la mayor parte de la jornada, este detalle incide directamente en los resultados del periodo de operación y provoca algunas variaciones con respecto al comportamiento normal esperado para la ruta.

2- Unidades utilizadas

Las unidades eléctricas que se utilizaron en las pruebas de la ruta San José - Alajuela 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) los buses solamente pueden llevar personas sentadas, 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 ruta San José – Alajuela se pactaron para un periodo de 4 meses, e iniciaron el 4 de agosto de 2021. Durante este periodo de operación se debió realizar una pausa para finiquitar la renovación de los seguros de las unidades, esta pausa comprendió desde el 27 de octubre hasta el 16 de diciembre de 2021. Posteriormente se detuvo la operación del 18 al 21 de enero por una falla en el sistema de monitoreo de los buses, cuyo centro de control se ubica en México y presentó fallas en ese país. Estos periodos de pausa del proyecto piloto llevaron la fecha de finalización de esta operación hasta el 11 de febrero 2022.

El plan de operación diario comprende la consecución de 5 vueltas completas a la ruta Alajuela – San José, lo cual implica una distancia diaria teórica de alrededor de 220 kilómetros.

Para efectos de este informe, se ha dividido la operación en dos períodos:

Período 1: comprende del 4 de agosto al 26 de octubre de 2021

Este periodo incluye la primera semana de operación, en la cual se tuvo una operación de solamente 4 vueltas completas a la ruta debido que se requería pasar un proceso de adaptación de las unidades a la ruta. Posteriormente se incluye dentro de este periodo 4 semanas completas de operación normal con 5 vueltas a la ruta.

La operación en este periodo se mantuvo estable, con parámetros de rendimiento similares y sin inconvenientes técnicos importantes que impidieran operar los buses eléctricos.

Período 2: comprende del 16 de diciembre 2021 al 11 de febrero 2022

Este periodo se ejecutó sin inconvenientes técnicos en las unidades eléctricas o cargadores. Solamente se presentó una falla en el sistema de monitoreo de pasajeros que detuvo la operación durante tres días, sin embargo, la misma tuvo origen en los servidores de la empresa que provee el servicio.

Este periodo se caracterizó por presentar valores de rendimiento de las unidades eléctricas menores a los obtenidos en el periodo anterior, lo cual se estudiará a fondo en futuros informes para comprender el fenómeno que se dio. Para efectos de este informe, solamente se presentan los resultados obtenidos.

4- Resultados

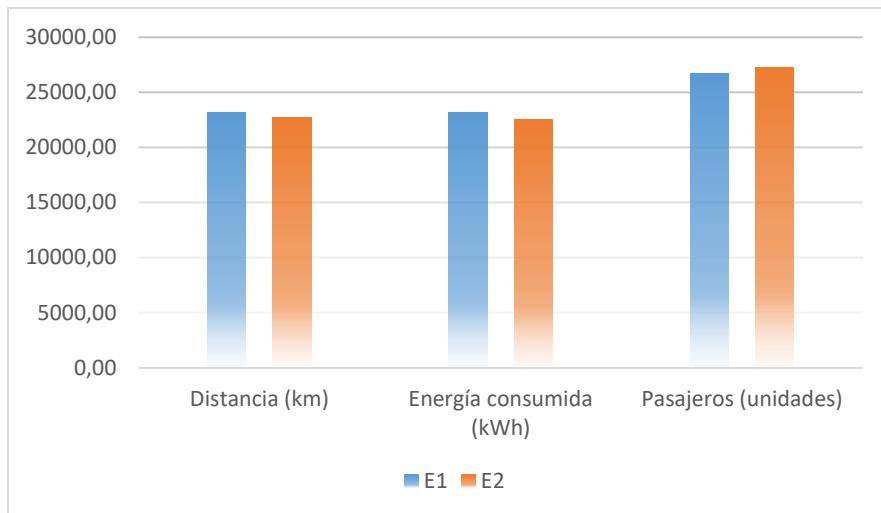
4.1 Estadísticas generales de la operación

Como se muestra en la figura 2, al final de la operación de la ruta San José – Alajuela se han recorrido con ambos buses eléctricos en conjunto más de 31 mil kilómetros, se transportaron más de 37 mil personas, y se han consumido más de 26 mil kWh de energía durante las recargas de las unidades.



Figura 2. Totales de kilometraje, pasajeros y energía consumida por buses eléctricos en operación San José - Alajuela

En la gráfica 1 se muestran las estadísticas por bus, donde se puede observar que ambas unidades mantuvieron números muy similares en las distintas variables, lo cual quiere decir que ambas se apegaron al plan operativo que se planeó para esta ruta como parte del proyecto piloto.



Gráfica 1. Estadísticas generales por bus durante la operación en la ruta San José – Alajuela

4.2 Rendimiento de los buses eléctricos

En la figura 3 se muestran los datos generales de rendimiento promedio para los buses eléctricos en la ruta San José – Alajuela. Para esta operación el consumo de energía promedio ha sido de **0,87 kWh/km**, con un promedio diario de disminución del estado de carga de la batería (SOC) de **70,5 %**, o lo que es lo mismo un remanente de batería (SOC) de **29,5 %** (promedio) al final del día típico de operación. Estos valores de rendimiento se obtienen gracias a un porcentaje promedio de regeneración de **33%**.

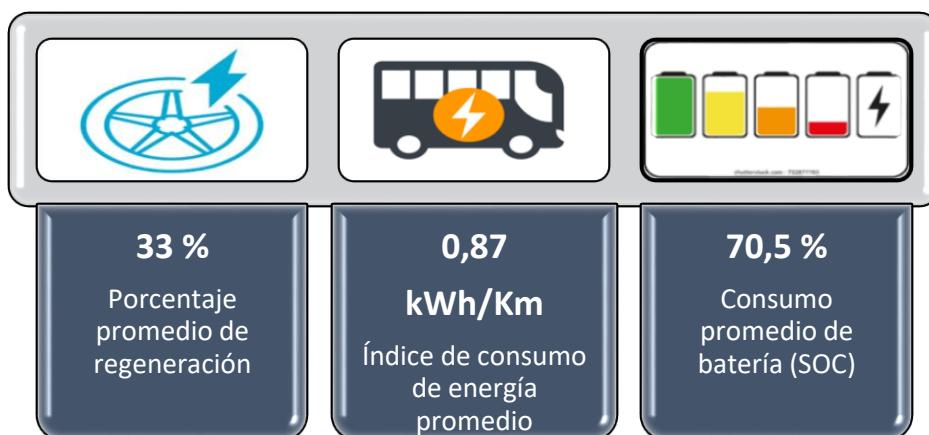
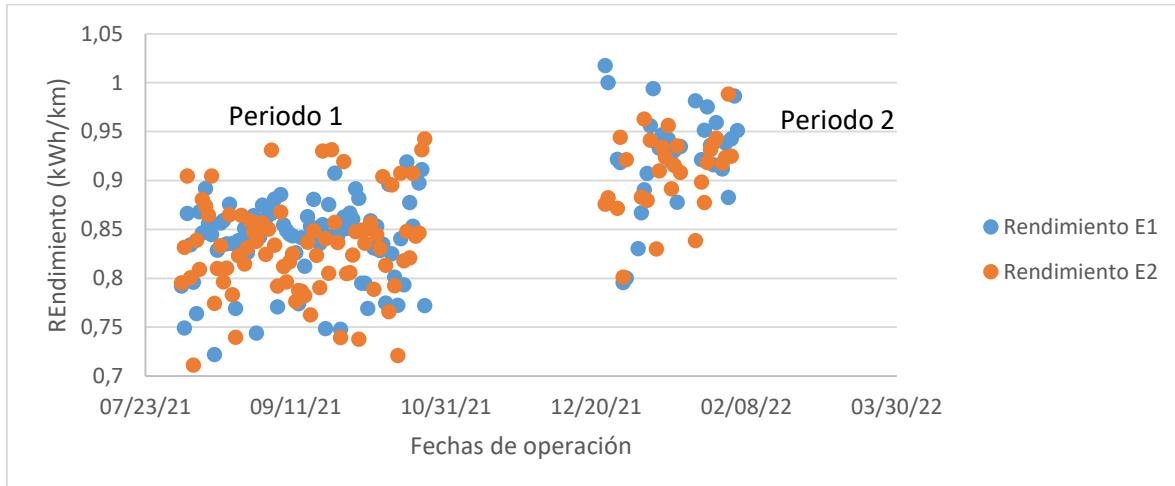


Figura 3. Promedios generales de rendimiento, regeneración y consumo de batería de buses eléctricos en operación San José - Alajuela

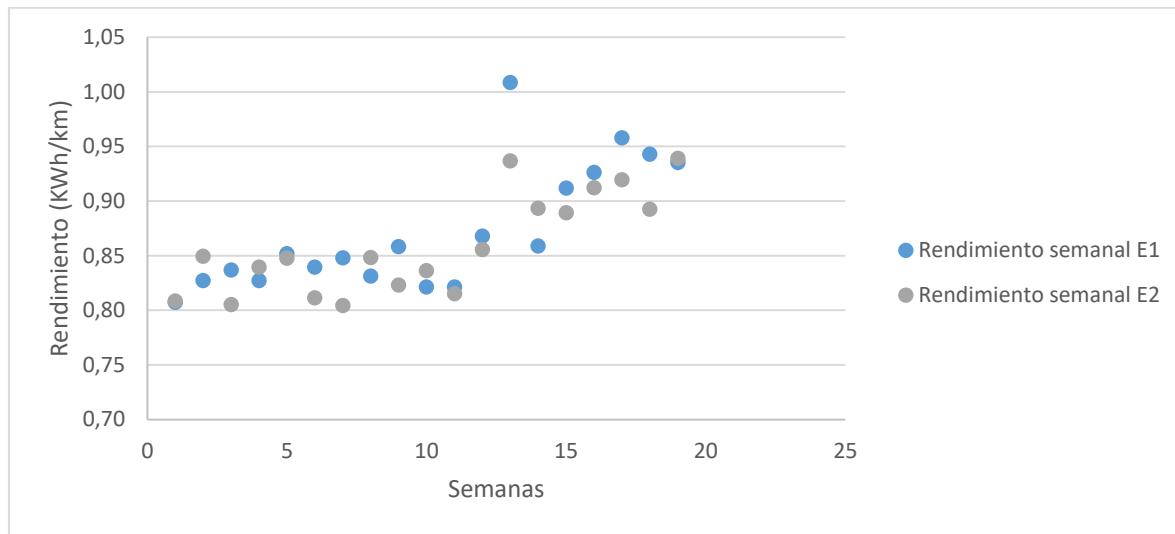
Es importante indicar que el comportamiento de los parámetros de rendimiento mostrados anteriormente varía a lo largo del tiempo según las condiciones específicas de operación de un periodo determinado. Por ejemplo, en la gráfica 2 se puede visualizar el comportamiento diario del índice de consumo de energía que como se aprecia a lo largo de la operación varía en un rango de entre aproximadamente 0,72 kWh/km y 1,01 kWh/km. Adicionalmente en la gráfica 3 se muestra la variación semanal del índice de rendimiento. El promedio de rendimiento de ambas unidades se mantuvo muy similar, tal como se aprecia en la tabla 2.

Tabla 2: promedio de rendimiento de los buses eléctricos

Promedio rendimiento E1		Promedio rendimiento E2	
General (kWh)	0,87	General (kWh)	0,86
Periodo 1 (kWh)	0,84	Periodo 1 (kWh)	0,83
Periodo 2 (kWh)	0,93	Periodo 2 (kWh)	0,91

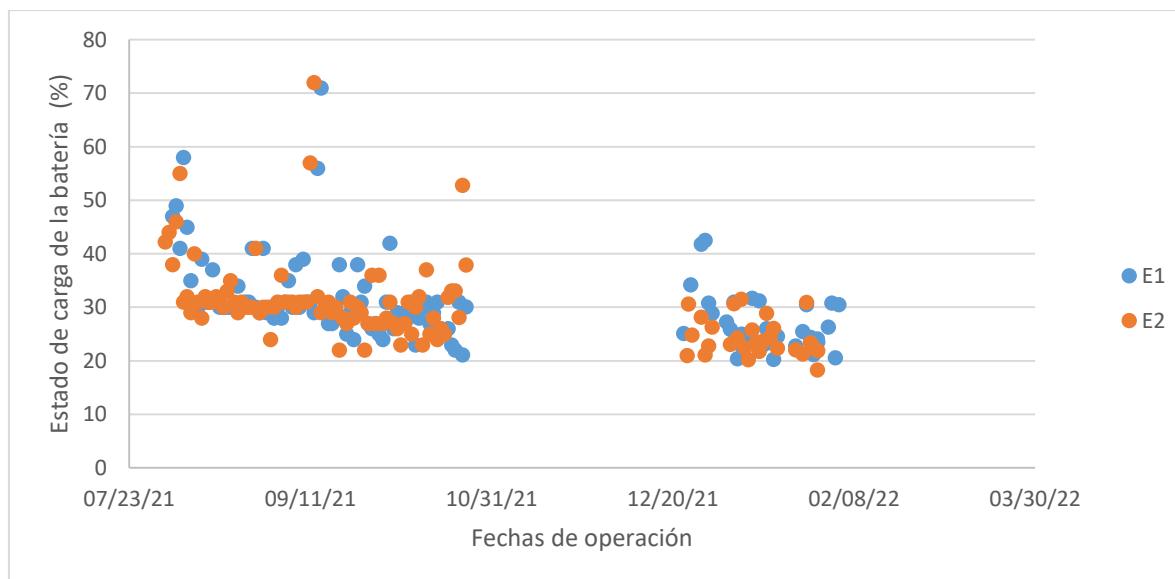


Gráfica 2. Variación del índice de rendimiento diario durante la operación en la ruta
San José - Alajuela



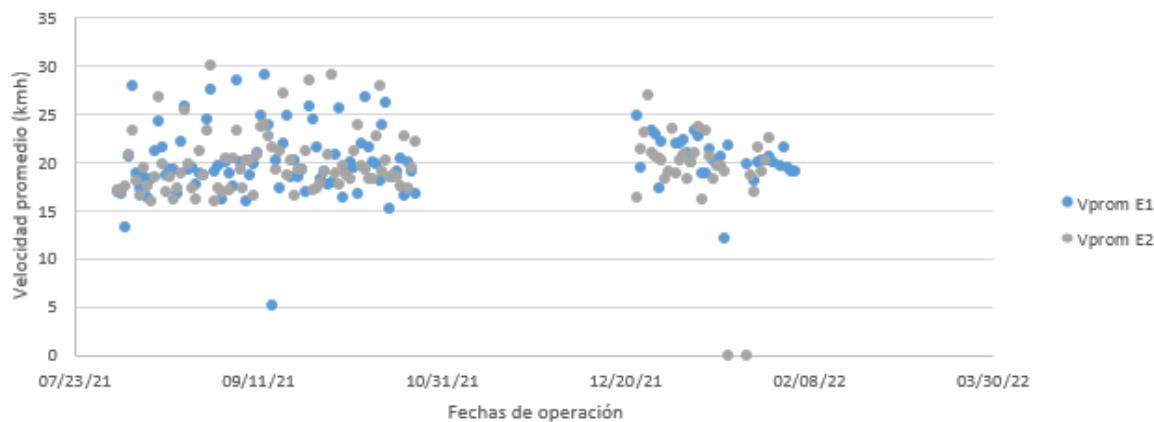
Gráfica 3. Variación del índice de rendimiento semanal durante la operación en la ruta San José - Alajuela

Es importante notar que, en este caso, durante el periodo 2 se obtuvo un mayor consumo de energía por parte de los buses eléctricos. Este aumento en el consumo se vio reflejado en el estado de carga de la batería (SOC) al final de cada día de operación, como se muestra en la gráfica 4 donde es posible identificar una tendencia hacia la disminución del estado de carga (% de batería remanente) al final de cada día de operación.



Gráfica 4. Variación del estado de carga final (% de batería remanente) diario durante la operación en la ruta San José - Alajuela

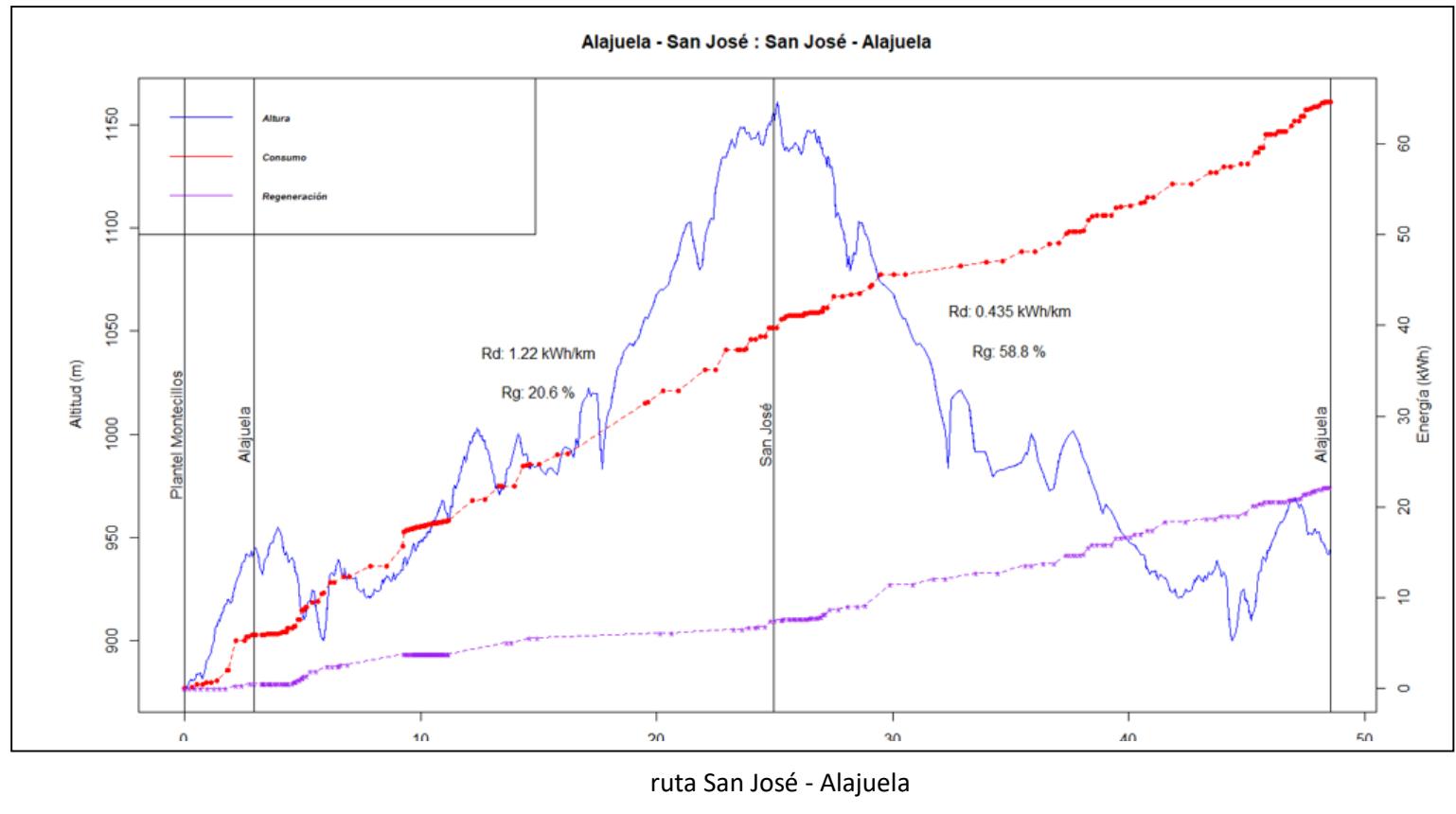
Las causas de este fenómeno serán abordadas en un estudio posterior a este, donde se analizarán bajo una metodología adecuada los factores que influyen en este rendimiento como lo son: modo de manejo del conductor, tráfico y cantidad de pasajeros. Preliminarmente, con los datos estudiados, el único de estos parámetros al que se le detectó una variación importante entre ambos períodos es la velocidad promedio. En la gráfica 5 se muestra el comportamiento de este parámetro a lo largo de la operación, donde es posible notar una tendencia en los valores de velocidad promedio a concentrarse en la línea de 20 km/h, contrario al periodo 1 donde el rango es más amplio, con una tendencia a alcanzar mayores velocidades durante las distintas carreras. Lo anterior puede ser un indicador de cambios en la densidad de tráfico vehicular, lo cual incide en el rendimiento de las unidades. El grado de afectación de este cambio en velocidad sobre el consumo de los buses deberá determinarse bajo metodologías adecuadas, pero se incluye en este informe como una hipótesis a considerar.



Gráfica 5. Variación de la velocidad promedio durante la operación en la ruta San José - Alajuela

Otro aspecto importante por considerar en el rendimiento de un bus eléctrico es la topografía, pues de acuerdo a las características de elevación de una ruta variará el desempeño del vehículo eléctrico. Como ejemplo de lo obtenido en la operación de la ruta Alajuela – San José, en la gráfica 6 se muestra el comportamiento del índice de consumo de energía y de regeneración a lo largo de la ruta para una carrera típica. Como se puede observar, en el sentido Alajuela – San José el consumo para este caso específico es elevado, sin embargo, cuando el bus va de San José hacia Alajuela el consumo baja considerablemente y la regeneración aumenta, recuperando de esta manera parte de la energía que consumió subiendo. Finalmente, estos valores se promedian y se obtienen los rendimientos promedio para la ruta en total que fueron mostrados con anterioridad, pero este ejemplo refleja de una manera oportuna el comportamiento del bus a lo largo de una ruta.

Gráfica 6. Variación del índice de rendimiento y regeneración a lo largo del recorrido en la



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 venían incluidos con las unidades. Estos cargadores son de 80 kW, y funcionan en corriente alterna, siendo una interface entre la red eléctrica y el bus. En la figura 4 se muestra el cargador utilizado y su respectiva instalación en la empresa TUASA.



Figura 4. Instalación de cargadores en TUASA

La recarga en esta operación tuvo las siguientes características:

- La recarga se realizó de **noche (por lo general entre 7 p.m y 12 m.n)**
- Promedio de energía recargada diario: **205 kWh**
- Promedio de duración de la carga: **2,6 horas**

4.4 Cuantificación de beneficios de operación de buses eléctricos

Para efectos de este reporte, se han cuantificado dos de los beneficios que se obtienen de la operación de buses eléctricos como son el ahorro en consumo de energía y la reducción de emisiones. En la figura 4 se muestran los valores promedio de estos beneficios, y además en la gráfica 7 se ejemplifica el orden de magnitud del costo diario de combustible y energía para el bus diésel y el eléctrico respectivamente.

Es importante recalcar que el costo de energía eléctrica en este caso particular tiene un valor cercano a la quinta parte del costo de diésel para una operación similar.

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 total a **68,32 tCO₂e**.

La cantidad de litros de combustible consumida en las carreras analizadas para efectos de estimación de ahorros fue de aproximadamente **19200 litros**.

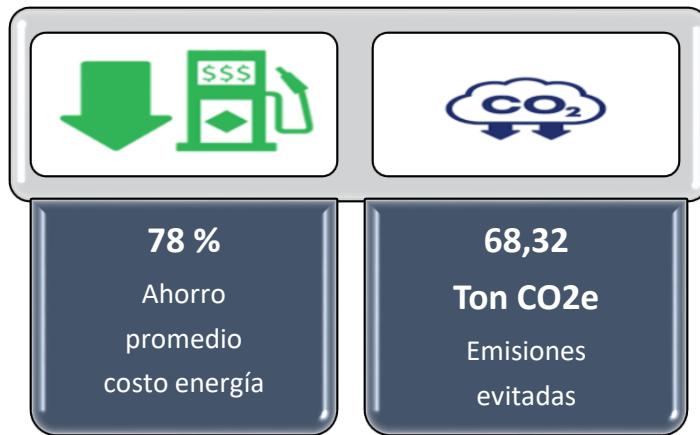
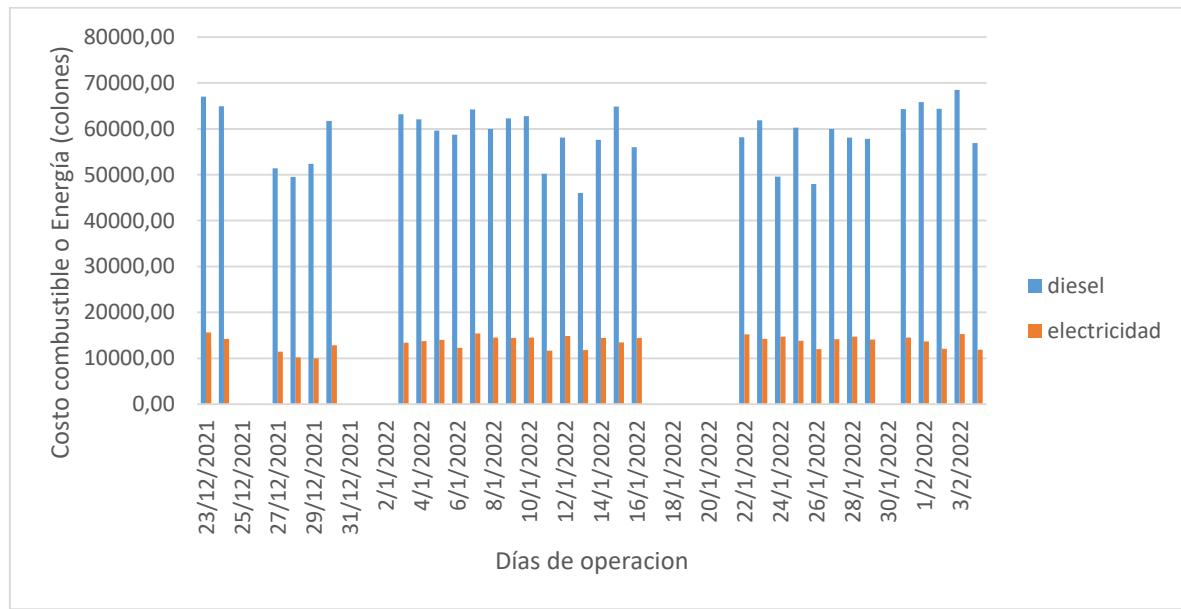


Figura 4. Promedios generales de ahorro en costo de energía y emisiones de CO₂ evitadas en operación San José – Alajuela



Gráfica 7. Orden de magnitud del costo de energía eléctrica y diésel en el segundo periodo de operación en la ruta San José – Alajuela para el bus E1 y su bus espejo diésel.

Como referencia, la tabla 3 muestra los promedios diarios de costo de energía y electricidad para los buses eléctricos y sus respectos buses espejo en el periodo 2, el cual es el más cercano a los precios actuales del combustible.

Tabla 3: promedio de costo diario de electricidad y combustible para el periodo 2

Promedio costo diario			
Electricidad bus E1	13524,96 kWh	Electricidad bus E2	13609,82 kWh
Diésel bus 101 (espejo de E1)	58742,35 litros	Diésel bus 102 (espejo de E2)	61873,72 litros

Los datos mostrados en esta sección de ahorro y emisiones se basan en lo siguiente:

1. Corresponden a datos promedio de una muestra de 1549 carreras, las cuales corresponden a días que se seleccionaron por mostrar datos similares de kilometraje y número de carreras, es decir, son días en que no hubo eventos particulares que hicieran que el bus eléctrico o circulara menos distancia que su contraparte o viceversa, lo cual es importante para poder comparar consumos.
2. Se utilizaron los precios vigentes del diésel en estaciones de servicio 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.

Para un adecuado entendimiento de los resultados obtenidos, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

4. Para el cálculo del índice de ahorro se tomaron en cuenta solamente las carreras en las que tanto el bus diésel como el eléctrico presentaron condiciones similares de operación, lo cual asegura tener la misma cantidad de carreras para ambos vehículos.
5. El costo de electricidad se basó en la tarifa fijada por ARESEP para carga de autobuses en planteles que es de 57,08 colones por kWh (más impuestos y otros rubros asociados al recibo eléctrico).
6. Se utilizaron los precios vigentes del diésel en estaciones de servicio 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.
7. En el periodo que se desarrolló la operación, existió la restricción de que solamente podían ir personas sentadas, 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. Se desarrollarán a futuro los análisis que permitan cuantificar la desviación que pueda causar este fenómeno en el porcentaje de ahorro calculado.

8. 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).
9. 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- Pasos siguientes

Como pasos siguientes en el proyecto piloto se tienen los siguientes:

1. Ejecución de la tercera ruta del piloto, la cual se espera que comience a mediados de marzo y se extienda hasta junio de 2022.
2. Cuantificación de otros beneficios como la reducción de costos de mantenimiento y la mejora en la salud ocupacional, para lo cual se estará trabajando 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