

## DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO SOSTENIBLES PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE BATERÍA: UN ENFOQUE MULTIOBJETIVO

Daniel Orlando Martínez Quezada, Universidad de Chile – daniel.martinez.q@ug.uchile.cl

Marcela A. Munizaga, Universidad de Chile – mamuniza@uchile.cl

Cristian E. Cortés, Universidad de Chile e Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) – ccortes@ing.uchile.cl

*Palabras clave: Diseño de rutas de transporte público, Vehículos eléctricos a baterías, Transporte público*

### RESUMEN

Las redes de transporte público diseñadas para operar con vehículos eléctricos de batería (BEV por sus siglas en inglés) han surgido como una solución prometedora para mitigar el impacto ambiental producto de la tecnología en base a motores de combustión. Sin embargo, la adopción generalizada de los BEV implica superar desafíos de autonomía limitada y altos tiempos de carga. En esta investigación, se presenta un método de solución basado en algoritmos genéticos para resolver los problemas de diseño de las redes de transporte público eléctricas, el establecimiento de frecuencias y la ubicación de infraestructura de carga, explorando diferentes compromisos entre las métricas de rendimiento de un sistema a partir de dos potenciales escenarios de recarga.

*Keywords: Public Transit Network Design , Battery Electric Vehicles , Algoritmos genéticos*

### ABSTRACT

Public transport networks designed for the operation of battery electric vehicles (BEVs) have emerged as a promising solution to mitigate the environmental impact of most used combustion engines. However, the widespread adoption of BEVs involves addressing challenges of limited range and high charging times. Therefore, this research presents a solution method based on genetic algorithms for facing the problems of electric public transport network design, frequency setting and charging infrastructure location, by exploring different trade-offs between the performance metrics of a system under two charging scenarios.

## 1. INTRODUCCIÓN

Algunas ciudades en el mundo han decidido realizar una progresiva adopción de vehículos eléctricos de batería (BEV) en sus sistemas de transporte público, incluso estableciendo como objetivo una sustitución completa de sus flotas actuales con tecnología diésel. El cumplimiento eficiente de este objetivo implicará encontrar estrategias que reduzcan los efectos negativos de la autonomía limitada y altos tiempos de carga propios de los BEV. En la literatura se presentan soluciones de tecnología de carga que una ciudad puede adoptar para la reducción de estos efectos negativos. Una propuesta de solución recurrente es la tecnología de carga de oportunidad, la cual permite el aprovechamiento de los tiempos muertos de operación en la carga de los vehículos; en el caso de transporte público es usual considerar la subida y bajada de pasajeros, involucrando una infraestructura de carga en los paraderos. Análogamente se encuentra la tecnología de carga en terminal o depósito, la cual no requiere de una infraestructura de carga en paradero, pero no contribuye a la mitigación de la autonomía limitada de los vehículos. No existe un consenso acerca de las condiciones de cuando recomendable utilizar una tecnología u otra. En el presente trabajo se busca desarrollar un método de solución para un problema del tipo *Transit Network Design Frequency Setting Problem based on Electric Vehicles* (conocido como E-TNDFSP) teniendo en cuenta diferentes tecnologías de carga y a partir de este método, evaluar su efecto en los costos de inversión, usuario y operador, y medidas de calidad del servicio.

Las contribuciones de este trabajo a la literatura son las siguientes:

- Desarrollar un método multiobjetivo para un problema integrado de diseño de rutas, determinación de frecuencias y localización de instalaciones de carga, incluyendo dos tipos de tecnologías de carga. En el caso de los trabajos de Iliopoulou y Kepaptsoglou (2021); Iliopoulou, Tassopoulos, et al. (2019); Iliopoulou y Kepaptsoglou (2019) consideran el diseño de rutas y la localización de estaciones de carga solo considerando una tecnología de carga de oportunidad. Liu, Feng, Ding, et al. (2020); Liu, Feng, Zhang, et al. (2020); Liu et al. (2022) integran los tres problemas, pero solo consideran la tecnología de carga en el terminal. En el caso de Zhang et al. (2021), se plantea un enfoque mono-objetivo para una tecnología de carga de oportunidad.
- Plantear una comparación de diferentes tecnologías de carga. Tal como se ha comentado, es normal encontrar trabajos que adopten una única tecnología, y en este sentido, habiendo revisado en forma exhaustiva la literatura, consideramos que este es el primer trabajo que busca comparar las tecnologías de carga en una integración de problema de diseño de rutas, determinación de frecuencias y localización de infraestructura de carga.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta de forma concisa el estado del arte de investigaciones relacionadas con el diseño de rutas de transporte público y en especial en el contexto de los BEVs. En la sección 4 se describe el método de solución desarrollado, para posteriormente en la sección 5 consolidar los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 6 se presentan los hallazgos más relevantes de el presente trabajo.

## 2. ESTADO DEL ARTE

El problema de diseño de rutas de transporte (TNDP por sus siglas en inglés), consiste en diseñar el conjunto de líneas que conformarán la red de transporte público. Para establecer el problema, se consta de una red de paraderos y caminos, así como la matriz de demanda entre los paraderos en un periodo de interés. El objetivo del problema es determinar la secuencia de paradas a visitar por cada línea o servicio, teniendo en cuenta los tiempos de viaje entre paradas y la demanda existente. Por otro lado, el problema de determinación de frecuencias (FSP por sus siglas en inglés) consiste, en establecer la frecuencia nominal de los servicios para cada una de las líneas que conforman una determinada red de transporte público. Teniendo en cuenta que la frecuencia es un factor importante para el nivel de servicio (tiempos de espera de usuarios), al igual que para el costo del operador (flota requerida), parece pertinente establecer una relación entre los problemas TNDP y FSP generando el problema de diseño de red de transporte con determinación de frecuencias, denominado TNDFSP Durán-Micco y Vansteenwegen (2022); Iliopoulou, Kepaptsoglou, y Vlahogianni (2019).

En un entorno de buses eléctricos a baterías (BEV) el problema de diseño de rutas y determinación de frecuencias mencionado en la Introducción, es denominado E-TNDFSP. Un interrogante en este contexto ha sido el diseño de red en el caso de contar con una flota mixta (buses diésel y a baterías) buscando la minimización de emisiones contaminantes Sadeghi et al. (2021). Debido a su fuerte dependencia con la infraestructura de carga (número de cargadores, de que tipo y en que lugares localizarlos) y tecnología de carga disponible (carga en depósito, carga de oportunidad o intercambio de baterías) se han desarrollado trabajos para la optimización conjunta de la localización y dimensionamiento de la infraestructura de carga. Iliopoulou, Tassopoulos, et al. (2019) propone la optimización del diseño de rutas en conjunto con la ubicación de infraestructura de carga utilizando un método de solución basado en un algoritmo de optimización de partículas multiobjetivo (MOPSO), solo considerando carga de oportunidad en paradero durante los tiempos de subida y bajada de pasajeros. Una versión mejorada del estudio anterior con carga de oportunidad dinámica (carga en partes del recorrido) es presentada en Iliopoulou y Kepaptsoglou (2019). A partir de sus trabajos previos, Iliopoulou y Kepaptsoglou (2021) plantea una versión robusta del problema de diseño, en la cual se introduce incertidumbre en el modelo a parámetros asociados a la disponibilidad de la infraestructura de carga, principalmente debido a la interacción de múltiples vehículos. Se debe resaltar que los estudios de Iliopoulou usan como bases de prueba para los análisis computacionales de los métodos, las bases de datos Mand'l y Munford. Por otro lado, en los estudios mencionados de Iliopoulou no se considera la frecuencia como una variable de decisión, ya que solo se considera el costo de usuario, sin embargo, son relevantes debido a su profundidad y detalle en la exploración de distintas tecnologías de carga, pese a que corresponden a un TNDP y no un TNDFSP. Zhang et al. (2021) propone el diseño de rutas de transporte público con carga de oportunidad, al igual que los estudios de Iliopoulou, pero en este caso se considera estaciones de carga rápida (la cual no es recomendable por la disminución de la vida útil de las baterías). En este trabajo se busca la optimización conjunta de la localización de infraestructura de carga, determinación de frecuencia y diseño de red de transporte público; los análisis allí presentados fueron realizados utilizando la red Mand'l.

Debido a que en los artículos de Iliopoulou no se determinan frecuencias óptimas, Liu, Feng, Ding, et al. (2020); Liu et al. (2022); Liu, Feng, Zhang, et al. (2020) plantean la optimización

de frecuencias junto con la localización de instalaciones de carga y el diseño de red. A diferencia de los estudios de Iliopoulou, estos consideran una tecnología basada en carga en depósito. La implementación de los estudios de Liu et al. (2022) son desarrollados a partir de datos reales de una ciudad de China; en Liu, Feng, Ding, et al. (2020) se desarrolla un método de solución para el diseño de rutas, ajuste de frecuencias y la ubicación de infraestructura de carga a partir de un algoritmo de enjambre de peces, algoritmos que es extendido a una versión multiobjetivo en Liu, Feng, Zhang, et al. (2020). Finalmente en Liu et al. (2022), se extiende la discusión sobre los beneficios de información en tiempo real en los niveles de congestión para la selección de ruta de un usuario, encontrando beneficios importantes en los costos percibidos por los usuarios en el contexto de BEV. Algunos trabajos han planteado la idea de una tecnología de carga basada en el intercambio de baterías. Un ejemplo de esto se encuentra en An et al. (2020), pero esta idea ha sido controvertida principalmente por limitantes técnicas tal y como se discute en Häll et al. (2019).

### **3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Este estudio se centra en el reto de integrar eficazmente los vehículos eléctricos de batería (BEV) en una red de transporte público. El objetivo es optimizar el diseño de la red de transporte público, determinar las frecuencias óptimas de los vehículos y ubicar estratégicamente la infraestructura de carga para garantizar un funcionamiento eficiente y fiable del sistema basado en BEV. El problema implica integrar el diseño de la red, el establecimiento del vector de frecuencias y la localización de la infraestructura de carga. El objetivo es minimizar el tiempo de viaje y el tiempo de espera para los pasajeros, minimizar la flota requerida, y minimizar los costos de infraestructura, teniendo en cuenta dos tecnologías de carga disponibles.

Resolviendo el problema del diseño de la red de transporte público y el establecimiento de frecuencias con vehículos eléctricos de batería e infraestructura de carga, esta investigación pretende contribuir al desarrollo de sistemas de transporte público sostenibles y eficientes. Los resultados de este estudio proporcionarán información sobre la integración óptima de los BEV, ayudando a promover soluciones de transporte limpias y amigables con el medio ambiente en el contexto de las redes de transporte público que deben convivir de manera armónica con el resto de las actividades y sistemas de las ciudades modernas.

### **4. MÉTODO DE SOLUCIÓN**

El método de solución basa su estructura en un algoritmo genético de ordenamiento no dominado de segunda generación (NSGA-II por sus siglas en inglés) propuesto por Deb et al. (2002). La valoración de las soluciones que genera el genético presenta dos componentes importantes, cuales son la asignación de pasajeros y la ubicación de infraestructura de carga, ambas resueltas por medio de los modelos de optimización descritos más adelante en subsecciones 4.2 y 4.3.

#### 4.1. NSGA-II

Un resumen de este algoritmo se presenta a continuación. Se basa en un algoritmo genético tradicional que busca la generación de una descendencia  $Q_t$  a partir de una población inicial  $P_t$ . Sin embargo, debido a su componente elitista y multiobjetivo, esta versión desarrolla un proceso particular de selección que comprende la integración de los individuos de la población  $P_t$  y descendencia  $Q_t$  en un único conjunto  $R_t$  el cual es ordenado y categorizado en subconjuntos denominados “frentes”  $F_i$ ; estos subconjuntos son obtenidos a partir de un “ordenamiento-no-dominado” cuyo propósito es identificar soluciones que “dominen” a las demás, es decir tengan un desempeño igual o mejor que las demás soluciones.

---

**Algorithm 1** NSGA-II

---

**Entradas:**  $N, G, p_m$   
 Definir  $P_t$   
 Generar  $Q_t$   
 $R_t \leftarrow P_t \cup Q_t$   
 $F \leftarrow \text{ordenamiento-no-dominado}(R_t)$   
 $P_{t+1} = \emptyset$  y  $i \leftarrow 1$   
**while**  $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$  **do**  
     *asignación-distancia-apilamiento*( $F_i$ )  
      $P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup F_i$   
      $i \leftarrow i + 1$   
**end while**  
*Ordenar*( $F_i, \prec_n$ )  
 $P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - |P_{t+1}|)]$   
 $Q_{t+1} \leftarrow \text{nueva-pob}(P_{t+1})$   
 $t \leftarrow t + 1$   
**Salidas:**  $F$

---

Los individuos seleccionados son las primeras  $N$  soluciones de los primeros subconjuntos de frentes  $F_i$ , en el caso de que al incluir un frente se exceda el tamaño  $N$  (esto debido a que  $|R_t| = 2N$ ) la selección estará dada por una medida llamada distancia de apilamiento (crowding distance en inglés), con esto se asegura que las soluciones elegidas en el conjunto  $F_1$  una aproximación de un frente de Pareto.

- *Estructura de la solución:* La solución queda cuantificada en dos arreglos: el primero es un arreglo binario de largo igual a  $|R|$  siendo  $R$  el conjunto de rutas candidatas para el problema, y donde cada elemento indica  $x_r = 1$  en el caso de que la ruta forme parte de la solución;  $x_r = 0$  en caso contrario. El segundo corresponde a un arreglo de índices con longitud  $|R|$  y cada elemento corresponde a un índice de un arreglo  $\theta_f$  que contiene los valores de frecuencia candidatos y este es de la forma  $\Theta = \{\theta_1 = 0, \theta_2, \dots, \theta_m\}$  siendo  $m$  la cantidad de valores de frecuencia posibles a asignar a una ruta  $r$ .
- *Operadores de crossover:* Los operadores elegidos para el cruce de individuos son cruce de un punto, cruce de dos puntos y máscara binaria.

- *Operador de mutación:* Para mutación se modifica aleatoriamente la frecuencia asignada a una ruta elegida, con un  $p_m$  de probabilidad, siendo  $p_m$  un parámetro del algoritmo a calibrar.

## 4.2. Asignación de pasajeros

La asignación de pasajeros se basa en el problema de asignación de pasajeros con transbordos propuesto por Cancela et al. (2015). Se describe como un modelo de programación lineal LP presentado en las ecuaciones 1 a 5. En la ecuación 1, se describe el objetivo de la suma del tiempo en vehículo y espera en cada paradero; en la ecuación 2 se condiciona el equilibrio de flujo, garantizando que la solución cumpla con la demanda indicada y flujo neto igual a cero en estaciones o nodos intermedios. La ecuación 3 controla el flujo  $v_a$  de cada arco y a su vez actualiza las esperas  $w_n$ ; las ecuaciones 4 y 5 definen la naturaleza de las variables de flujo y esperas totales, respectivamente. Se debe resaltar que el modelo de asignación no es concebido para la red de paraderos o infraestructura vial, sino que se define desde un grafo de trayectorias  $G^T$  el cual permite enumerar las posibles estrategias de cada usuario a partir de un diseño dado.

$$\min_{v,w} \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{n \in N} w_n \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{a \in A_n^+} v_a - \sum_{a \in A_n^-} v_a = b_n \quad \forall n \in N \quad (2)$$

$$v_a \leq f_a w_n \quad \forall a \in A_n^{W+}, n \in N \quad (3)$$

$$v_a \geq 0 \quad \forall a \in A \quad (4)$$

$$w_n \geq 0 \quad \forall n \in N \quad (5)$$

## 4.3. Instalación de infraestructura

La localización de infraestructura es modelada a partir de un problema de localización similar al modelo de Iliopoulou, Tassopoulos, et al. (2019) para el caso de tecnología de carga de oportunidad. Para el caso de carga en terminal se plantea el proceso descrito en el algoritmo 2.

- *Carga de oportunidad:* para la carga de oportunidad se busca encontrar la mínima cantidad de ubicaciones de carga que permita garantizar un cumplimiento de las restricciones de autonomía limitada y modelar los procesos de carga y descarga de los BEV. En la ecuación 6 se establece la función objetivo, que corresponde a la cantidad de paraderos con sistema de carga, por lo que la variable binaria de localización  $Z_i$  es igual a 1 (es decir,  $Z_i = 1$ ) cuando un cargador es ubicado en el paradero  $i$  y  $Z_i = 0$  cuando el paradero no tiene un sistema de carga instalado. Los tiempos de carga  $t_{char_{ir}}$  son limitados (ver ecuación 7) por el tiempo de subida y bajada de pasajeros  $dt_{ir}$  menos los tiempos de acoplamiento y desacoplamiento al cargador  $tc$  y  $tdc$  respectivamente, en el caso de que una instalación de carga sea localizada.

La actualización de la variable  $E_{ir}$  que corresponde a la energía en la batería al momento de llegar al paradero  $i$  se realiza en las ecuaciones 8 y 9. La autonomía limitada se encuentra plasmada en las restricciones 10 y 11. En la ecuación 12 se condiciona a que cada terminal sea una estación de carga, ya que se asume que ahí alcanza un estado de carga inicial  $SOC_{ini}$ ; en el caso de tener no factibilidad en el modelo 6-12 se asume la electrificación de toda la malla y se actualizan los valores de  $t_{char_{ir}}$  y  $E_{jr}$  tomando en cuenta las restricciones 7, 8 y 9.

$$\min \sum_i Z_i \quad (6)$$

Sujeto a:

$$t_{char_{ir}} \leq Z_i \cdot (dt_{ir} - tc - tdc) \forall i \in N, r \in R^* \quad (7)$$

$$E_{ir} = SOC_{ini} \cdot BC \forall i \in S_r^*, r \in R^* \quad (8)$$

$$E_{jr} = E_{ir} - EC_{ijr} + t_{char_{jr}} \cdot CP \cdot Cef \forall i, j \in N, r \in R \mid EC_{ijr} > 0, j \notin S_r^* \quad (9)$$

$$E_{ir} \geq EC_{ijr} + SOC_{\min} \cdot BC \forall i, j \in N, r \in R \mid EC_{ijr} > 0 \quad (10)$$

$$E_{ir} \leq SOC_{\max} \cdot BC \forall i \in N, r \in R \quad (11)$$

$$Z_i = 1 \forall i \in S_r^*, r \in R \quad (12)$$

- **Carga en terminal:** La carga en terminal solo considera instalaciones de carga en los paraderos terminales y establece el cálculo de la energía necesaria para realizar la expedición y la cantidad de estaciones requeridas a partir de la solución, tal como se muestra en el algoritmo 2.

---

#### Algorithm 2 Carga en Terminal

---

**Entradas:**  $R^*, EC_{ijr}, BC, SOC_{ini}, S, S^*$

$Z_i \leftarrow 1 \forall i \in S^*$

$E_{ir} \leftarrow SOC_{ini} \times BC \forall i \in S^*$

$E_{jr} \leftarrow E_{ir} - EC_{ijr} \forall j \notin S^*, i \in S$

**Salidas:**  $\sum Z_i, E_{ir}$

---

#### 4.4. Objetivos del método de solución

Los objetivos que se consideran para poder computar el *fitness* del algoritmo son tres, en los cuales se consolidan medidas de desempeño desde el operador, los usuarios y la infraestructura de carga. El costo de operador  $f_1$  es definido en la ecuación 13 y corresponde al tamaño de flota mínimo requerido, en donde  $t_{cr} = \sum_{a \in A_r} c_a$  corresponde al tiempo de ciclo de la ruta  $r$ ,  $t_{ch\ r} = \frac{E_{ini,r} - E_{fin,r}}{Cef \times CP}$  es el tiempo de carga estimado en el depósito, que equivale a la energía requerida en una expedición  $E_{ini,r} - E_{fin,r}$  dividida en la potencia efectiva del sistema de carga  $Cef \times CP$ , con  $Cef$  definida como la constante de transferencia efectiva y  $CP$  la potencia de carga. Los objetivos  $f_2$  y  $f_3$  dan

cuenta del costo de usuario y costo de infraestructura previamente definidos, respectivamente (ver ecuaciones 14 y 15). El método descrito apunta a la minimización conjunta de los tres objetivos.

$$f_1 = B = 2 \sum_r f_r \times (t_{cr} + t_{chr}) \times x_r \quad (13)$$

$$f_2 = \sum_{a \in A} c_a v_a + \sum_{n \in N} w_n \quad (14)$$

$$f_3 = \sum_i Z_i \quad (15)$$

## 5. RESULTADOS

Para validar la consistencia del método de diseño, se utilizó la base de datos de Mandl (1980), que se presenta en la Figura 1. A partir de estos datos, se generó un conjunto de rutas candidatas utilizando el método propuesto por Ceder y Wilson (1986), con un parámetro  $\alpha$  establecido en un 40 % (como se sugiere en el documento de referencia). Los parámetros considerados en esta implementación se resumen en la Tabla 1, y se tomaron de Iliopoulou, Tassopoulos, et al. (2019), ya que representan características técnicas de los cargadores y los vehículos eléctricos disponibles en el mercado. Debido a la complejidad de los problemas de optimización asociados a este algoritmo, se ajustaron los valores del tamaño de la población, el número de generaciones y la probabilidad de mutación a  $N = 20$ ,  $G = 10$ ,  $p_m = 0,1$ . Los valores de frecuencia considerados fueron  $\theta_f = \{0, \frac{1}{60}, \frac{1}{30}, \frac{1}{5}\}$ , según lo recomendado por Iliopoulou, Tassopoulos, et al. (2019). Además, se fijó el parámetro de transferencias permitidas en el problema de asignación de pasajeros en  $\tau = 3$ , lo que permite como máximo 2 transferencias.

Parámetro	Valor
Velocidad promedio	15 Km/h
Consumo por kilómetro promedio	2.5 kWh/km
Tiempos de subida y bajada de pasajeros	40 s estaciones de transferencia 20 s otras
Tiempos de acoplamiento y desacoplamiento	5 s
Eficiencia de carga	90 %
SOC inicial	80 %
Capacidad de batería	60 kWh
Potencia de cargador	200 kW
Requerimientos de SOC	Mínimo 30 % y máximo 90 %

Tabla 1: Parámetros técnicos



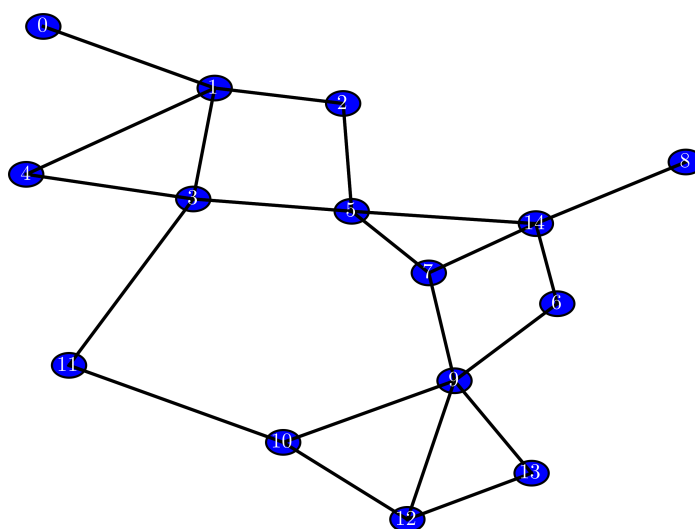


Figura 1: Red Mandl

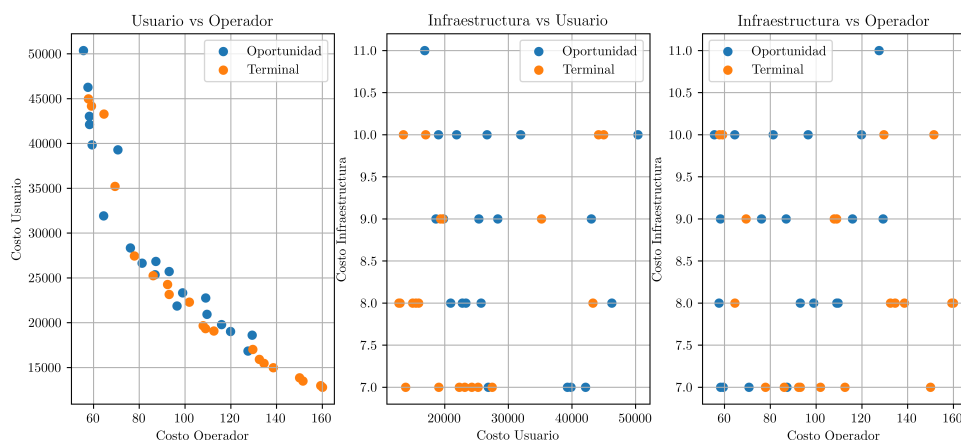


Figura 2: Frente de Pareto

En la Tabla 2 se presenta una comparación de los costos del sistema de transporte público utilizando las dos tecnologías de carga (oportunidad y terminal), separado por componente (operador, usuario, infraestructura). En estas pruebas experimentales, se obtienen valores similares en ambas tecnologías. En el caso de los costos de usuario se tienen valores inferiores en la política de carga en terminal, pero aun así no hay una dominancia estricta, encontrando en muchos casos valores similares en la tecnología de carga de oportunidad. Al analizar el costo de operador, se obtienen valores inferiores en la carga de oportunidad, pero también existen valores de costo de operador indiferentes entre tecnologías. El costo de infraestructura presenta valores similares en ambas tecnologías, pero es de resaltar que existen algunas soluciones con mayor costo en la tecnología de oportunidad.

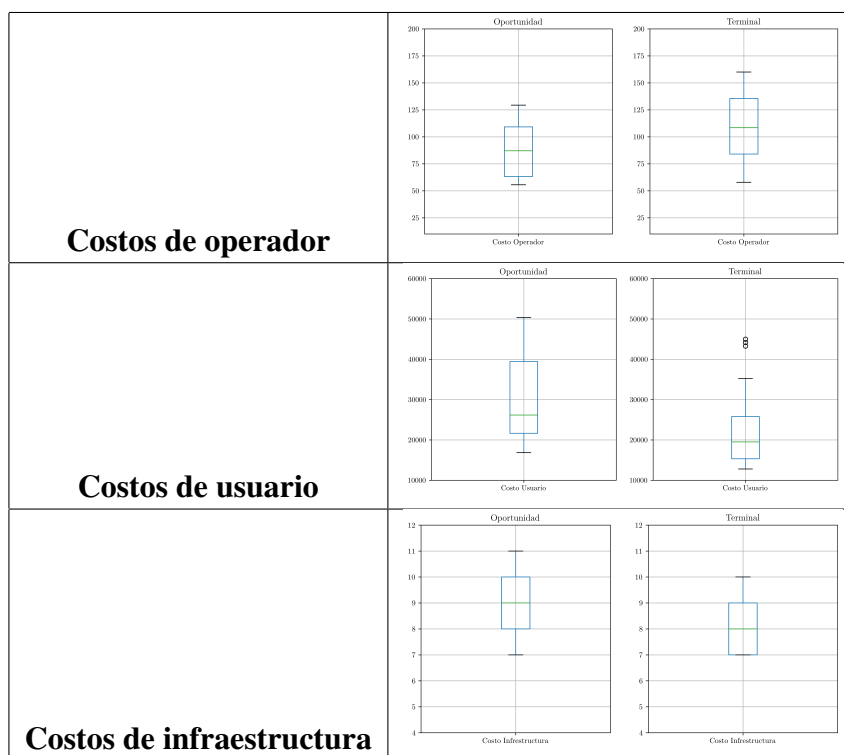


Tabla 2: Comparación de costos del sistema de transporte

En la Figura 2 se realiza una comparación de los costos de operador, usuario e infraestructura para ambas tecnologías. Al analizar los costos de usuarios y operador existe una dominancia parcial de la carga de oportunidad. En el caso de costo de infraestructura, existe un rango amplio de valores en el caso de carga de oportunidad y en terminal, sin embargo, no se puede asegurar una dominancia estricta del costo de infraestructura de carga.

En la Tabla 3, Tabla 5 y Tabla 6, Tabla 7 se muestran las redes resultantes de las soluciones con mejor desempeño desde la perspectiva de los usuarios y operadores para cada una de las tecnologías. Los nodos representan paraderos y aquellos resaltados en color verde representan la presencia de cargadores, donde es interesante notar que para el caso de carga en terminal, los cargadores se asocian al primer paradero de la ruta. La cantidad de rutas generadas es mayor para el caso de las soluciones con mayor beneficio para los usuarios que para los operadores, implicando en ambos casos una relación directa entre la mejor calidad del servicio y el aumento de la diversidad de rutas, fenómeno que se intensifica cuando se implementa la tecnología de carga de oportunidad.

<b>Objetivos</b> Operador: 127.51 Usuario: 16841.04 Infraestructura: 11.0	<b>Objetivos</b> Operador: 55.60 Usuario: 50365.68 Infraestructura: 10.0
<b>Rutas</b> Ruta 1 - [13, 9, 7, 14, 8] Ruta 2 - [13, 9, 7, 5, 3, 4, 1, 0] Ruta 3 - [12, 13, 9, 7] Ruta 4 - [12, 10, 9, 6, 14, 5] Ruta 5 - [12, 9, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 6 - [12, 10, 11, 3, 1, 2] Ruta 7 - [12, 13, 9, 7, 5, 2, 1] Ruta 8 - [12, 13, 9, 7, 5, 3, 1] Ruta 9 - [12, 10, 9, 7, 14, 5, 3, 1] Ruta 10 - [12, 9, 6, 14, 5, 2, 1, 3, 4] Ruta 11 - [12, 13, 9, 7, 5, 2, 1, 3] Ruta 12 - [12, 10, 9, 7, 5, 2, 1, 3, 4] Ruta 13 - [12, 13, 9, 7, 5, 2, 1, 3, 4] Ruta 14 - [12, 10, 9, 6, 14, 7, 5, 2, 1, 4] Ruta 15 - [12, 13, 9, 6, 14, 7, 5, 3, 1, 4] Ruta 16 - [11, 3, 1, 2, 5, 7, 14, 6] Ruta 17 - [10, 11, 3, 1] Ruta 18 - [10, 9, 6, 14, 7, 5, 2] Ruta 19 - [8, 14, 5, 2] Ruta 20 - [8, 14, 6, 9, 13] Ruta 21 - [8, 14, 7, 5, 2, 1, 3, 11] Ruta 22 - [6, 14, 5, 2, 1, 4] Ruta 23 - [6, 14, 7, 5, 2, 1, 4] Ruta 24 - [5, 14, 6, 9, 10] Ruta 25 - [4, 3, 1, 0] Ruta 26 - [4, 1, 2, 5, 7, 14, 8] Ruta 27 - [4, 3, 5, 14, 6, 9, 10] Ruta 28 - [4, 3, 5, 14, 6, 9, 12] Ruta 29 - [2, 5, 7, 9, 13] Ruta 30 - [1, 3, 11, 10, 12, 13] Ruta 31 - [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12] Ruta 32 - [0, 1, 3, 5, 14, 6, 9, 10] Ruta 33 - [0, 1, 3, 5, 14, 7, 9, 12] Ruta 34 - [0, 1, 2, 5, 7, 14, 6, 9, 13, 12]	<b>Rutas</b> Ruta 1 - [13, 9, 7, 5, 3, 1, 0] Ruta 2 - [12, 10, 11, 3, 4] Ruta 3 - [12, 13, 9, 7, 14, 5, 3, 1, 4] Ruta 4 - [12, 13, 9, 6, 14, 7, 5, 3, 1, 4] Ruta 5 - [9, 7, 14, 5, 3] Ruta 6 - [8, 14, 5, 7, 9] Ruta 7 - [8, 14, 7, 9, 10, 12, 13] Ruta 8 - [8, 14, 5, 2, 1, 3, 11] Ruta 9 - [6, 14, 5, 3, 1, 0] Ruta 10 - [5, 14, 6, 9, 10] Ruta 11 - [4, 1, 2, 5, 7, 14, 8] Ruta 12 - [2, 5, 7, 9, 13] Ruta 13 - [1, 2, 5, 7, 14, 6] Ruta 14 - [1, 2, 5, 7, 14, 8] Ruta 15 - [1, 3, 11, 10, 12, 13] Ruta 16 - [0, 1, 2, 5, 7, 14, 8] Ruta 17 - [0, 1, 2, 5, 7, 14, 6, 9, 13, 12]

Tabla 3: Soluciones tecnología de oportunidad (a)

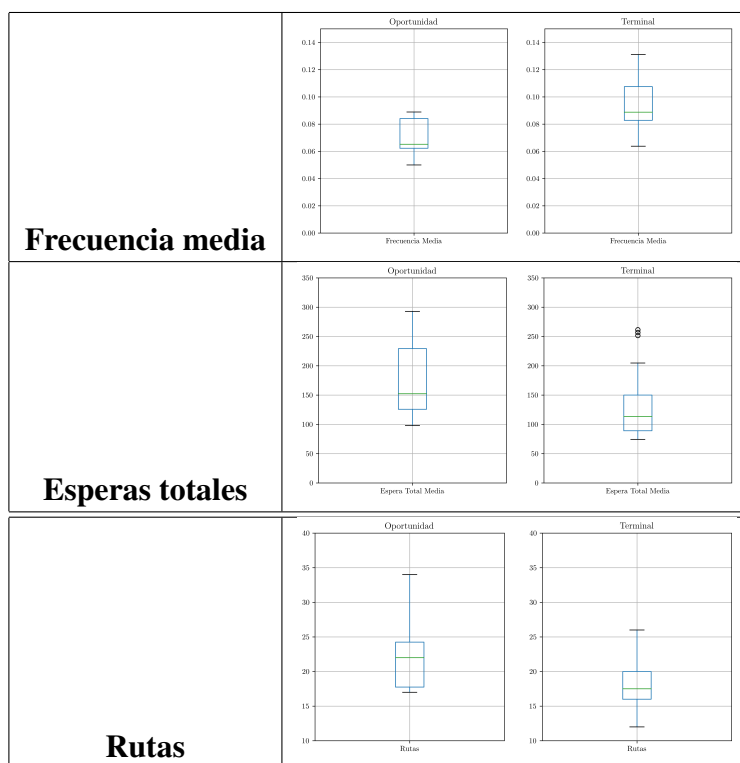


Tabla 4: Indicadores de calidad de servicio

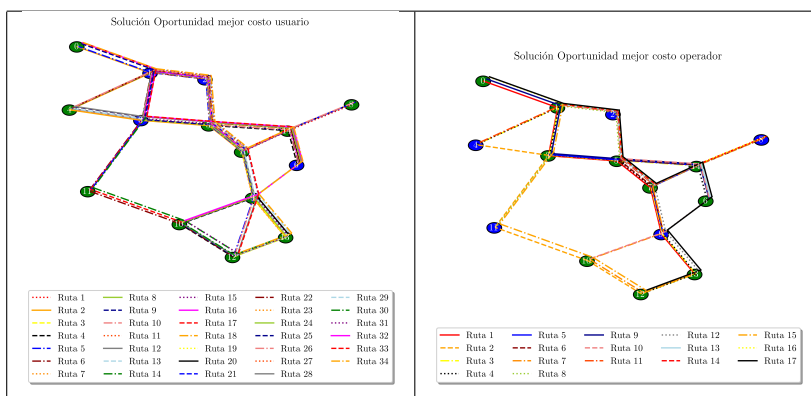


Tabla 5: Soluciones tecnología de oportunidad (b)

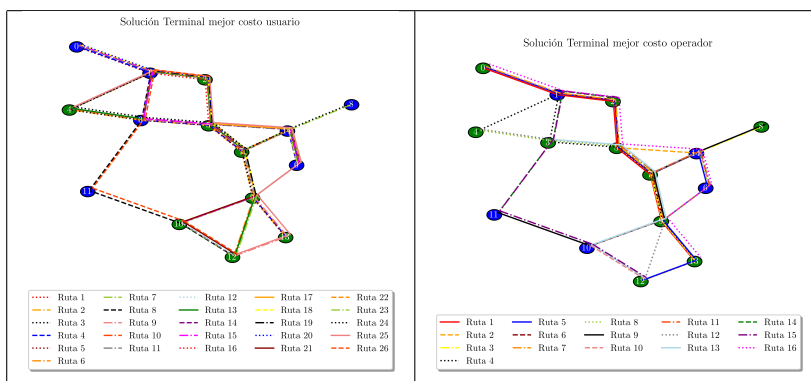


Tabla 7: Soluciones tecnología en Terminal (b)

<b>Objetivos</b> Operador: 160.03 Usuario: 12795.75 Infraestructura: 8.0	<b>Objetivos</b> Operador: 57.82 Usuario: 44979.59 Infraestructura: 10.0
<b>Rutas</b> Ruta 1 - [13, 9, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 2 - [13, 9, 7, 5, 3, 4, 1] Ruta 3 - [13, 9, 7, 5, 3, 4, 1, 0] Ruta 4 - [13, 9, 6, 14, 7, 5, 3, 1, 0] Ruta 5 - [13, 9, 6, 14, 7, 5, 3, 1, 4] Ruta 6 - [12, 9, 6, 14, 7] Ruta 7 - [12, 10, 9, 6, 14, 8] Ruta 8 - [12, 10, 11, 3, 1, 4] Ruta 9 - [12, 13, 9, 7, 5, 3, 4] Ruta 10 - [12, 9, 7, 5, 2, 1, 3, 4] Ruta 11 - [12, 10, 9, 7, 14, 5, 2, 1, 0] Ruta 12 - [12, 10, 9, 7, 5, 3, 4, 1] Ruta 13 - [12, 9, 6, 14, 7, 5, 2, 1, 3, 4] Ruta 14 - [10, 9, 6, 14, 5, 3, 1, 0] Ruta 15 - [10, 9, 6, 14, 7, 5, 3, 1, 0] Ruta 16 - [9, 7, 5, 2, 1] Ruta 17 - [9, 7, 14, 5, 2, 1] Ruta 18 - [9, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 19 - [9, 7, 5, 2, 1, 4] Ruta 20 - [9, 6, 14, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 21 - [7, 14, 6, 9, 10, 12] Ruta 22 - [5, 7, 14, 6, 9] Ruta 23 - [5, 7, 14, 6, 9, 12] Ruta 24 - [4, 3, 5, 7, 14, 8] Ruta 25 - [4, 1, 2, 5, 14, 6, 9, 13, 12] Ruta 26 - [2, 1, 3, 11, 10, 12]	<b>Rutas</b> Ruta 1 - [13, 9, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 2 - [12, 13, 9, 7, 14, 5] Ruta 3 - [12, 13, 9, 7, 14, 8] Ruta 4 - [12, 13, 9, 7, 5, 3, 1, 4] Ruta 5 - [12, 13, 9, 6, 14, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 6 - [9, 7, 5, 2, 1] Ruta 7 - [9, 7, 5, 2, 1, 0] Ruta 8 - [9, 6, 14, 7, 5, 3, 4] Ruta 9 - [8, 14, 7, 9, 10, 11] Ruta 10 - [7, 14, 6, 9, 10, 12] Ruta 11 - [5, 7, 14, 6, 9] Ruta 12 - [4, 3, 5, 7, 14, 6, 9, 12] Ruta 13 - [3, 5, 7, 9, 10, 12] Ruta 14 - [2, 1, 3, 11] Ruta 15 - [2, 1, 3, 11, 10, 12] Ruta 16 - [0, 1, 2, 5, 14, 6, 9, 13]

Tabla 6: Soluciones tecnología en Terminal (a)

En la Tabla 4 se presentan algunos indicadores del nivel de servicio, los cuales corresponden a la frecuencia media de las rutas por solución, las esperas totales promedio de las rutas por cada solución y la cantidad de servicios por cada solución. En términos de frecuencia, se observan valores similares para ambas tecnologías, pero en el caso de la carga en terminal se percibe una concentración en los valores más altos. Por otro lado, en el caso de las esperas no se aprecian diferencias significativas, resaltando que los valores de la tecnología en terminal tienen una mayor concentración en valores bajos de la escala. Finalmente, respecto de la cantidad de servicios que resultan del modelo, se encuentran soluciones con la misma cantidad de servicios para ambas tecnologías, pero se logra ver que algunas soluciones de la tecnología de oportunidad tienen una mayor cantidad de servicios que todas las soluciones de tecnología de carga en terminal; de forma análoga, se observa que para algunas soluciones de la tecnología de carga en terminal, proponen una menor cantidad

de servicios que las soluciones de oportunidad.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolla un método de solución para un E-TNDFSP en el contexto de vehículos eléctricos a baterías, integrando a su vez la localización de instalaciones de carga. El método desarrollado se basa en un marco de trabajo multiobjetivo permitiendo el estudio simultáneo de métricas del sistema como lo son el costo de operador, usuarios e infraestructura de carga. Se encuentra que existe una dominancia parcial de la tecnología de carga de oportunidad en cuanto a costos de operador y usuario, pero este resultado no se puede generalizar cuando se analizan con cuidado los costos de inversión en infraestructura. Un efecto evidenciado en los resultados obtenidos es que para una disminución de los costos de usuario, normalmente se observa un aumento en la cantidad de rutas, tanto para la tecnología de oportunidad como para la carga en terminal, pero el efecto se amplifica en la tecnología de carga de oportunidad a una frecuencia baja. Como investigación futura se recomienda aplicar el método a redes más grandes y explorar otras estructuras de solución y operadores genéticos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID BECAS/DOCTORADO NACIONAL/5286-2021, y por el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ANID PIA/PUENTE AFB220003).

## REFERENCIAS

- An, K., Jing, W., y Kim, I. (2020). Battery-swapping facility planning for electric buses with local charging systems. **International Journal of Sustainable Transportation**, 14 (7), 489–502.
- Cancela, H., Mauttone, A., y Urquhart, M. E. (2015). Mathematical programming formulations for transit network design. **Transportation Research Part B: Methodological**, 77, 17–37.
- Ceder, A., y Wilson, N. (1986). **Bus network design**. *transpn. res.* B.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., y Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **IEEE transactions on evolutionary computation**, 6 (2), 182–197.
- Durán-Micco, J., y Vansteenwegen, P. (2022). A survey on the transit network design and frequency setting problem. **Public Transport**, 14 (1), 155–190.

- Häll, C. H., Ceder, A., Ekström, J., y Quttineh, N.-H. (2019). Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, 23 (3), 216–230.
- Iliopoulou, C., y Kepaptsoglou, K. (2019). Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 77, 178–197.
- Iliopoulou, C., y Kepaptsoglou, K. (2021). Robust electric transit route network design problem (re-trndp) with delay considerations: Model and application. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 129, 103255.
- Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K., y Vlahogianni, E. (2019). Metaheuristics for the transit route network design problem: a review and comparative analysis. **Public Transport**, 11, 487–521.
- Iliopoulou, C., Tassopoulos, I., Kepaptsoglou, K., y Beligiannis, G. (2019). Electric transit route network design problem: Model and application. **Transportation Research Record**, 2673 (8), 264–274.
- Liu, Y., Feng, X., Ding, C., Hua, W., y Ruan, Z. (2020). Electric transit network design by an improved artificial fish-swarm algorithm. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, 146 (8), 04020071.
- Liu, Y., Feng, X., Yang, Y., Ruan, Z., Zhang, L., y Li, K. (2022). Solving urban electric transit network problem by integrating pareto artificial fish swarm algorithm and genetic algorithm. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, 26 (3), 253–268.
- Liu, Y., Feng, X., Zhang, L., Hua, W., y Li, K. (2020). A pareto artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective electric transit network design problem. **Transportmetrica A: Transport Science**, 16 (3), 1648–1670.
- Mandl, C. (1980). Applied network optimization.
- Sadeghi, M., Aghayan, I., y Ghaznavi, M. (2021). A cuckoo search based approach to design sustainable transit network. **Transportation letters**, 13 (9), 635–648.
- Zhang, W., Zhao, H., y Song, Z. (2021). Integrating transit route network design and fast charging station planning for battery electric buses. **IEEE Access**, 9, 51604–51617.