



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Técnica de localización óptima de electrolineras basada en problema de ruteo de vehículos eléctricos

Gabriel Ignacio Fuentes Soto
Profesor guía: Claudio Burgos
Profesor co-guía: Juan Gómez

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
Enero 2024

Índice

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. OBJETIVO GENERAL	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	7
2.3.1. <i>Problema de ruteo</i>	7
2.3.2. <i>Ubicación de electrolineras</i>	7
2.4. CONTRIBUCIONES	7
3. MARCO TEÓRICO.....	8
3.1. ELECTROLINERA	8
3.2. RECARGA DE VEHÍCULO ELÉCTRICO	8
3.2.1. <i>Tipo de recarga</i>	8
3.2.2. <i>Modo de recarga</i>	9
3.2.3. <i>Conectores</i>	10
3.3. VRPy	11
3.4. ALGORITMO DE AHORROS DE CLARKE Y WRIGHT	13
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
5. METODOLOGÍA.....	20
5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN (E–VRP: ELECTRIC VEHICLE ROUTING PROBLEM)	20
5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN EN VRPy	22
5.2.1. <i>Integración de variable de carga a VRPy</i>	22
5.2.2. <i>Integración de electrolineras a VRPy</i>	23
5.3. PRUEBAS DE LOCALIZACIÓN DE ELECTROLINERAS.....	24
5.3.1. <i>Evaluación de los casos de estudio</i>	24
5.3.2. <i>Criterio de decisión</i>	25
6. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS.....	29
6.1. RUTA RANCAGUA–MACHALI	29
6.1.1. <i>Tráfico vehicular</i>	29
6.1.2. <i>Vehículos eléctricos en la zona</i>	30
6.1.3. <i>Centros de carga existentes</i>	30
6.1.4. <i>Pruebas de localización de electrolineras</i>	31
6.2. PROVIDENCIA	34
6.2.1. <i>Tráfico vehicular</i>	35
6.2.2. <i>Vehículos eléctricos en la zona</i>	36

6.2.3. Centros de carga existentes	36
6.2.4. Pruebas de localización de electrolineras	37
6.3. ANÁLISIS DE AMBOS CASOS	40
7. CONCLUSIÓN	42
7.1. TRABAJO FUTURO	43
8. REFERENCIAS.....	44
9. ANEXOS	49
9.1. ALGORITMO DE CLARKE Y WRIGHT	49
9.1.1. Diagrama de flujo.....	49
9.1.2. Ejemplo de aplicación de algoritmo de Clarke y Wright	49
9.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE RESTRICCIÓN DE CARGA Y ELECTROLINERA	51
9.3. ELECTROLINERAS EN RANCAGUA–MACHALÍ Y PROVIDENCIA	53
9.4. AUTONOMÍA Y VELOCIDAD PROMEDIO PARA CADA CASO DE ESTUDIO.....	54
9.5. RESULTADOS ISNTANCIAS DE RUTEO	59
9.5.1. Resultados en Rancagua–Machalí para electrolineras en zonas de alto tráfico vehicular.....	59
9.5.2. Resultados en Rancagua–Machalí para electrolineras en zonas de bajo tráfico vehicular.....	61
9.5.3. Resultados en Providencia para electrolineras en zonas de alto tráfico vehicular ...	61
9.5.4. Resultados en Providencia para electrolineras en zonas de bajo tráfico vehicular...	62

Resumen

El aumento de la demanda de vehículos eléctricos, impulsado por la Estrategia Nacional de Electromovilidad que fomenta su uso plantea el desafío de aumentar los puntos de carga de estos de manera óptima. Este estudio se enfoca en determinar de manera óptima la ubicación de electrolineras, considerando el tráfico en la zona, la cantidad de vehículos eléctricos y la existencia de electrolineras previas.

Este enfoque está basado en un problema de ruteo de vehículos eléctricos (electric vehicle routing problem) utilizando una electrolinera de por medio en la ruta, para así validar la ubicación de la misma a través de la metodología propuesta. En esta, se establecen distintas ubicaciones de electrolineras en un mapa y a partir de la definición de 4 instancias de ruteo, tanto para el caso de estudio ubicado en la conurbación Rancagua-Machalí como en el de la comuna de Providencia, se resuelve cada una con una electrolinera de por medio. La ubicación de la electrolinera en donde los recorridos son más rápidos y el costo en consumo energético es menor, conviene ubicar la misma.

Los resultados para el caso Rancagua-Machalí muestran que, en promedio, el ahorro energético al realizar los recorridos con las electrolineras escogidas como óptimas es de 3,56% en carga, y en tiempo el ahorro es de 3,72 minutos. Para el caso de la comuna de Providencia, el ahorro energético en realizar cada recorrido es en promedio de 5,17% en carga y el ahorro en tiempo es de 2,89 minutos.

En la línea de la ingeniería, los resultados pueden ser utilizados como un primer paso para la planificación y dimensionamiento de las ubicaciones óptimas obtenidas con esta técnica. Obtener un correcto dimensionamiento de la electrolinera ayudará a satisfacer de buena forma la futura demanda de energía. En el ámbito investigativo, se pueden considerar aspectos más detallados para abordar este problema con la solución propuesta, como pueden ser los desniveles en las calles, el recurso energético disponible en las distintas ubicaciones o también simular escenarios en donde la hora del día afecte las soluciones de las instancias de ruteo.

Palabras clave: electromovilidad, electrolineras, vehículos eléctricos, electric vehicle routing problem

1. Introducción

La adopción de las energías renovables se ha visto impulsada por la constante búsqueda de soluciones que ayuden a combatir la contaminación y el cambio climático. Estas no se centran solo en la generación de energía, sino que también se extienden a otros sectores clave para su uso de manera eficiente y no contaminante, como lo es la electromovilidad. La electromovilidad se ha convertido en un pilar fundamental en la transición hacia un planeta más sustentable, y es que al ser su principal fuente de energía la electricidad, no producen emisiones directas de CO₂ (Plataforma de electromovilidad – Beneficios de la electromovilidad, s.f.), impactando directamente en el mejoramiento de la calidad del aire en las ciudades.

El uso de vehículos eléctricos en Chile ha experimentado un crecimiento significativo, principalmente impulsado por la modernización del transporte público. La Región Metropolitana, actualmente cuenta con 1000 buses eléctricos en circulación y se espera que este número aumente a las 2000 unidades para inicios de 2024 (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2023). Este avance se alinea con la Estrategia Nacional de Electromovilidad promovida por el Ministerio de Energía, la cual tiene como objetivo que para el año 2050, el 40% de los vehículos de uso privado y la totalidad de los vehículos destinados al transporte público sean totalmente eléctricos. El propósito de esta iniciativa es que Chile logre la neutralidad de carbono para el año 2050, con lo cual la Estrategia Nacional de Electromovilidad busca contribuir con un 20% de las reducciones de gases de efecto invernadero para ello (Ministerio de Energía – Estrategia Nacional de Electromovilidad, 2021).

Estos vehículos, en contraste con los de combustión interna, utilizan baterías como fuente principal de energía. Para mantener su operatividad es necesario contar con una adecuada infraestructura de carga que facilite la adopción de estos a futuro. Actualmente en Chile, según datos de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), existen 1102 puntos de recarga públicos, de los cuales cerca del 66% son de carga semi-rápida, 25% de carga rápida y 9,6% de carga ultra-rápida (potencia mayor a 50 kW), los cuales representan una potencia instalada de 22,18 MW.

Debido a los objetivos que tiene la Estrategia Nacional de Electromovilidad nace la necesidad de expandir la infraestructura de carga a nivel país. Sin embargo, no es viable instalar centros de carga en cualquier ubicación sin tener en consideración, por ejemplo, datos de tráfico, densidad de población, permisos y/o regulaciones, acceso al recurso energético en la zona, etc. Esta situación plantea un desafío crucial: ¿cómo optimizar la ubicación de las electrolineras?

En este trabajo se llevará a cabo la optimización de la ubicación de estaciones de recarga rápida, debido a como su nombre indica, el tiempo de carga para los vehículos eléctricos es mucho menor en comparación a los centros de carga semi-rápida o lenta. Los factores para localizar las electrolineras serán el tráfico en la zona, cantidad de vehículos eléctricos y electrolineras ya existentes. Teniendo esto en consideración, se validarán las ubicaciones mediante una técnica basada en ruteo de vehículos, en el cual se evaluará una función de costo que pondere el conjunto de recorridos más rápido y con menor consumo energético. En la ubicación en donde estos recorridos sean más rápidos y el costo en consumo energético es menor, convendrá ubicar una electrolinera.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Optimizar la ubicación de electrolineras mediante técnica basada en ruteo de vehículos eléctricos.

2.2. Objetivos específicos

- Formular un problema de ruteo de vehículos eléctricos para su integración en VRPy.
- Evaluar cada caso de estudio en base a densidad de tráfico, cantidad de vehículos eléctricos y electrolineras ya existentes.
- Definir un conjunto de posibles ubicaciones de electrolineras en la zona de cada caso de estudio en función de los puntos del objetivo anterior.
- Programar extensión para el paquete VRPy que permita resolver problemas de ruteo de vehículos eléctricos con oportunidad de recarga.
- Validar la estrategia propuesta en los casos de estudio.

2.3. Alcances y Limitaciones

2.3.1. *Problema de ruteo*

- Se considera que un nodo puede ser visitado solamente 1 vez en el recorrido, es decir, un vehículo no se cargará 2 veces en la misma electrolinera.
- Se asume una autonomía directamente proporcional a la distancia recorrida (no se consideran rutas en pendientes ni tiempos en que el vehículo está detenido).
- El tiempo de recarga en la electrolinera es fijo.

2.3.2. *Ubicación de electrolineras*

- Se supondrá que toda zona céntrica de la ciudad es apta para instalar la electrolinera en cuanto a recurso energético disponible se refiere.

2.4. Contribuciones

- Entregar una librería modificada de VRPy que permite resolver el problema de ruteo para vehículos eléctricos.
- Entregar una técnica para la localización óptima de electrolineras en una ciudad o pueblo.

3. Marco Teórico

3.1. Electrolinera

Una electrolinera es una infraestructura apta para proporcionar carga eléctrica a los vehículos eléctricos a batería (BEV) y los vehículos híbridos enchufables (PHEV). Esta se conforma de múltiples cargadores eléctricos que hacen de interfaz entre el vehículo y la red de suministro de energía (Plataforma de electromovilidad – Información de cargadores para vehículos eléctricos, s.f.). En la Figura 1 se observa una electrolinera de la compañía Enel X.



Figura 1: Electrolinera enelXway (ElectroMOV, 2023).

3.2. Recarga de vehículo eléctrico

3.2.1. Tipo de recarga

Se puede optar por distintos tipos o modos de recarga para satisfacer las necesidades de carga del vehículo. En cuanto a los tipos de recarga, estos se clasifican de acuerdo al nivel de potencia disponible, los cuales son:

- Carga lenta: Este tipo de recarga se utiliza principalmente en el hogar, donde la demanda de potencia no sobrepasa los 3,6 kW (Plataforma de electromovilidad – Cargadores de vehículos eléctricos, s.f.).
- Carga semi-rápida: Está orientada para lugares públicos, otorgando una potencia de recarga que va desde los 6 kW hasta los 44 kW (Plataforma de electromovilidad – Cargadores de vehículos eléctricos, s.f.).
- Carga rápida: Orientada a ser similar a las estaciones de servicio convencionales, donde existen detenciones cortas y tiempos de recarga rápidos. Estos centros pueden abastecer

una potencia de entre 50–200 kW para el vehículo (Plataforma de electromovilidad – Cargadores de vehículos eléctricos, s.f.).

3.2.2. Modo de recarga

Existen 4 modos de carga para vehículos eléctricos, los cuales estandarizan los sistemas de recarga internos y externos del vehículo (Maza y Gómez, 2019). Estos son:

- **Modo 1:** La recarga es en corriente alterna y se realiza a través de una toma de corriente doméstica, por lo tanto, la potencia máxima de recarga está limitada a 2,2 kW a 10 A. Por seguridad se debe contar con una protección diferencial con toma a tierra (Plataforma de electromovilidad – Modos de carga, s.f.). No es recomendable para vehículos de gran tamaño, pues depende de la calidad y estado de la instalación eléctrica desde donde será tomada la energía (Plataforma de electromovilidad – Modos de carga, s.f.).
- **Modo 2:** La recarga, al igual que en el modo 1 se realiza en corriente alterna, solo que ahora se incorpora un sistema de protección y control en el cable. Este sistema debe ser capaz de comprobar la buena conexión entre el vehículo y la instalación eléctrica en caso de emergencia (Mera, 2020). Los niveles de potencia van desde los 2,2 kW en sistema monofásico y 11 kW en sistema trifásico (Plataforma de electromovilidad – Modos de carga, s.f.).
- **Modo 3:** La recarga se hace en corriente alterna, conectando el vehículo a una estación de carga. Se tiene un alto grado de comunicación entre el vehículo y la red eléctrica debido a las características de construcción de la estación y el tipo de conexión que existe entre el vehículo y la misma (Maza y Gómez, 2019). La potencia suministrada va hasta los 3,5 kW en sistema monofásico y 44 kW en sistema trifásico (Plataforma de electromovilidad – Modos de carga, s.f.).
- **Modo 4:** La recarga se hace en corriente continua a través de un cargador externo, el cual tiene incorporada la electrónica de potencia necesaria para realizar la conversión AC/DC para la recarga de baterías. Las potencias son sobre 40 kW con un alto control sobre la carga (Plataforma de electromovilidad – Modos de carga, s.f.).

3.2.3. Conectores

Existen distintos tipos de conectores para llevar a cabo las recargas de los vehículos, los más comúnmente utilizados son:

- Mennekes: Este conector consta de 7 pines, es compatible en sistemas monofásicos y trifásicos. Proporciona potencia desde los 7 kW hasta los 44 kW.
- SAE J1772: Este conector tiene 5 pines, dos son para la línea y neutro, uno para la toma a tierra y los otros dos para la comunicación (Tobón y Restrepo, 2018). Este conector está diseñado para operar a una potencia máxima de recarga de 7 kW.
- CHAdeMO: Diseñado para centros de carga rápida. Suministra potencia hasta los 50 kW (Protocol Development – CHAdeMO, s.f.). Además, este conector tiene la capacidad de permitir el flujo de energía bidireccional, más conocido como V2G (Jar et al., 2016).
- CCS: El sistema de carga combinado, como su propio nombre indica, combina un conector de corriente alterna, como puede ser el mismo Mennekes, añadiendo dos pines adicionales para corriente directa. Con esto es posible utilizar un solo conector para diversos tipos de carga.

Estos tipos de conectores se ven en la Figura 2.



Figura 2: Tipos de conectores. a) SAE J1772, b) CHAdeMO, c) Mennekes, d) CCS (Plataforma de electromovilidad–Modos de carga, s.f.).

3.3. VRPy

VRPy es un paquete de Python que ayuda a resolver el problema de ruteo de vehículos. Este problema se centra en la forma de satisfacer la demanda de un conjunto de clientes con el objetivo de minimizar los costos asociados, empleando el algoritmo de Clarke y Wright (Lysgaard, 1997), un algoritmo glotón y un método basado en generación de columnas. Este último es una técnica utilizada para abordar problemas combinatorios de manera eficiente.

Para utilizar VRPy es necesario contar con las librerías Networkx, cspy, PuLP y NumPy. La primera librería es necesaria para representar los puntos a visitar en el mapa en un grafo dirigido. El segundo, cspy, es un paquete que reúne algoritmos para resolver el problema de la ruta más corta restringida (constrained shortest path problem), entre los cuales está la búsqueda tabú (tabú search), procedimiento de eliminación greedy, optimización por enjambre de partículas, entre otros (cspy documentation, s.f.). PuLP es una librería utilizada para resolver problemas de optimización mediante programación lineal (PuLP, 2022), que junto a cspy, sirve para determinar qué tipo de método de resolución se le quiere dar al problema (programación lineal o programación dinámica). Por último, NumPy es una librería utilizada para el manejo de números mediante múltiples funciones matemáticas, transformadas de Fourier, álgebra lineal básica, operaciones estadísticas, entre otras funciones (NumPy V1.26, s.f.).

Entre los problemas de ruteo que resuelve VRPy se encuentran:

- Capacited Vehicle Routing Problem: Problema de ruteo de vehículos en el cual la capacidad de los vehículos es limitada.
- Capacited Vehicle Routing Problem with resource constraint: Problema de ruteo de vehículos en el cual la capacidad de los vehículos es limitada, se establece una duración máxima de la ruta y máximo de clientes a visitar.
- Capacited Vehicle Routing Problem with Time Windows: Problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada en el cual los clientes tienen una hora de preferencia a ser visitados.

Uno de los enfoques de resolución proporcionado por VRPy es el basado en generación de columnas. Para comprender esto, primeramente, se muestra el problema maestro que resuelve

VRPy. Se tiene un grafo dirigido $G = (V, A)$ en donde V representa los nodos que deben ser visitados y A como el conjunto de aristas disponibles para visitar dichos nodos. Con esto en consideración, el problema maestro se muestra en la Ecuación (1).

$$\min \sum_{r \in \Omega} c_r \lambda_r \quad (1)$$

En esta formulación, Ω es el conjunto de rutas posibles y λ_r es una variable binaria que indica si una ruta ha sido tomada o no. Al definir a_{ir} como una variable binaria, donde a_{ir} es 1 si se visita al cliente i en la ruta r y 0 en caso contrario, el problema se puede expresar como un problema de partición de conjuntos. En este contexto, el objetivo es seleccionar un conjunto de rutas con el costo mínimo, asegurando que cada cliente esté incluido en al menos una ruta (Ecuación (2) y Ecuación (3)) (VRPy – Mathematical Background, 2020).

$$\sum_{r \in \Omega | i \in r} a_{ir} \lambda_r \geq 1 \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$\lambda_r \in \{0,1\} \quad \forall r \in \Omega \quad (3)$$

El enfoque de generación de columnas surge de la necesidad de abordar el problema sin analizar todas las posibles rutas que puedan cumplir las restricciones. Para implementar este método, se relaja el problema maestro al permitir que la variable binaria λ_r tome los valores entre 0 y 1 ($0 \leq \lambda_r \leq 1$). Luego, se selecciona un conjunto de rutas que satisfacen las restricciones de (1) y se trabaja con el dual del problema maestro relajado. Denotando π_i como la variable dual de λ_r se tiene que es de la forma:

$$\max \sum_{i \in r} \pi_i \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r \in \Omega' | i \in r} a_{ir} \pi_i \leq c_r \quad \forall r \in \Omega' \quad (5)$$

$$\pi_i \geq 0 \quad (6)$$

En donde Ω' es solo una parte del conjunto del total de rutas. Dado este nuevo problema en consideración, la idea inicial consiste encontrar una ruta r que cumpla con las restricciones del problema dual. Para verificar que esto no es así, basta con comprobar que:

$$\sum_{r \in \Omega, i \in r} a_{ir} \pi_i > c_r \quad (7)$$

En este caso, el costo marginal de la variable λ_r esta dada por (Simchi-levi, 2014):

$$\hat{c}_r = c_r - \sum_{r \in \Omega, i \in r} a_{ir} \pi_i \quad (8)$$

En el caso en que una ruta presente un costo marginal negativo de la variable (o ruta) λ_r , entonces, esta ruta es añadida al problema maestro relajado. Se resuelve nuevamente, se usa esta columna para resolver el dual del problema maestro relajado hasta encontrar una ruta que no viole las restricciones de las ecuaciones (5) (6) y en este caso, se resuelve el problema maestro entero.

Otra forma de encontrar una ruta que presente un costo marginal negativo es con un algoritmo glotón que viene en el paquete VRPy. Este algoritmo genera una ruta que comienza en el nodo de origen y selecciona aleatoriamente una arista que una al origen con otro nodo de menor costo reducido que no cierren un ciclo (que vuelva al nodo origen), se ejecuta nuevamente desde el nodo que llegó al siguiente (VRPy – Mathematical Background, 2020). Todas las rutas con costo marginal negativo se agregan al conjunto de columnas del problema maestro relajado (VRPy – Mathematical Background, 2020).

Por último, en la solución inicial que entrega VRPy se utiliza el algoritmo de Clarke y Wright (Lysgaard, 1997), el cual está detallado en la sección 3.4.

3.4. Algoritmo de ahorros de Clarke y Wright

El algoritmo de ahorros de Clarke y Wright es un algoritmo heurístico para dar solución al problema de ruteo de vehículos. El objetivo principal de todo problema de ruteo de vehículos asociados a la logística es la minimización de la distancia total recorrida por cada vehículo repartidor que sale desde un punto de abastecimiento (bodega) hacia los destinos de los clientes, sin violar restricciones asociadas a capacidad del vehículo repartidor, la visita única a cada cliente y la satisfacción de sus necesidades (Lysgaard, 1997).

Este método de ahorros se basa en determinar cuánto se ahorra en costo al combinar en una sola ruta lo que antes eran dos rutas separadas, como se ilustra en la Figura 3:

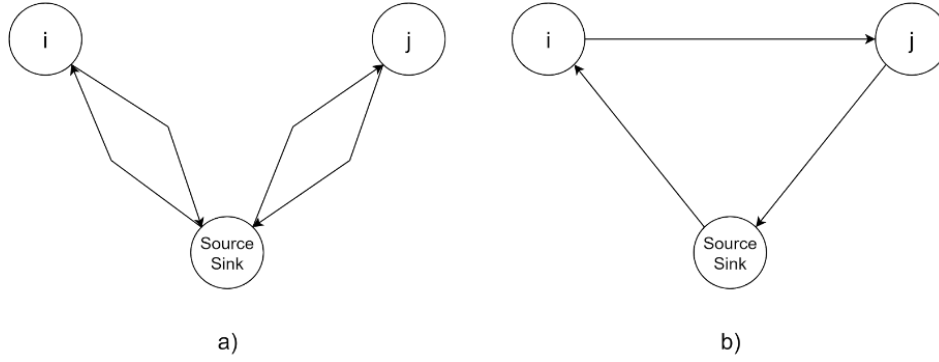


Figura 3: Ilustración del concepto de ahorros (Lysgaard, 1997).

Para determinar los ahorros, el primer paso del algoritmo se basa en realizar una ruta que solo visite a un nodo para luego retornar a la bodega, con el fin de calcular la distancia total recorrida por el vehículo (Lysgaard, 1997):

$$D_a = c_{source,i} + c_{i,source} + c_{source,j} + c_{j,source} \quad (9)$$

Luego de esto se combinan los dos destinos para determinar el nuevo costo asociado a esta ruta (Lysgaard, 1997):

$$D_b = c_{source,i} + c_{i,j} + c_{j,source} \quad (10)$$

Los ahorros vienen dados por la Ecuación (11):

$$S_{ij} = c_{i,source} + c_{source,j} - c_{i,j} \quad (11)$$

Con esto, se genera una matriz de ahorros que contiene todos los pares posibles de rutas a ser combinadas. Al ordenar los ahorros de mayor a menor, se procede a la inicialización de la primera ruta con el primer par de nodos, que presenta el mayor beneficio en términos de ahorro. Si, en el segundo ahorro máximo, hay un nodo que no forma parte de esta primera ruta, se debe verificar si la inclusión de este nodo no viola la restricción de capacidad del camión. En caso de violación, se avanza al siguiente par de nodos con ahorro máximo. Este algoritmo se encuentra detallado en el diagrama de flujo representado en Anexo 1.1 y un ejemplo de aplicación del mismo en Anexo 1.2.

4. Revisión Bibliográfica

El problema de la óptima localización de electrolineras tiene distintos enfoques y tipos de soluciones, dependiendo de si se tienen en cuenta los tiempos de recarga, el recurso energético de la zona, la autonomía vehicular, la congestión vehicular, normativa energética, accesibilidad, densidad de población, entre otros aspectos relevantes. En esta revisión del estado del arte se busca ver cuáles son las soluciones ya existentes y ver las que pueden ser un aporte para esta investigación.

En la revisión de Pagany et al. (2019) se describe que las técnicas de localización de electrolineras se pueden dividir en tres categorías. En la primera de estas, el enfoque va en analizar la densidad de la población o de la demanda. Un ejemplo de esta técnica se ve en el trabajo de Brooker y Qin (2015), en el cual el enfoque de localización de electrolineras se basa en determinar áreas que satisfagan la mayor demanda posible. Para hacerlo, se realiza un análisis de datos obtenidos desde el National Household Travel Survey (2022) para comprender el comportamiento de los viajes y encontrar patrones para predecir en que momento del día y que fracción de vehículos podrían usar las estaciones de carga en las distintas ubicaciones de estudio.

La segunda técnica descrita en la revisión emplea las técnicas de particionamiento del territorio. En esta se destaca el trabajo de Andrenacci et al. (2016), en el cual se analizan datos de flujo de tráfico en la ciudad de Roma, para así obtener patrones de rutas comunes de vehículos eléctricos. Una vez obtenidos dichos patrones con punto de destino, utilizando el método de agrupamiento K-Means se busca obtener que el centro de cada clúster (electrolinera) en la ciudad minimice la distancia total de cada punto de destino común.

En la última categoría entran todas las técnicas asociadas a la optimización de la red de transporte, abarcando los problemas que simulan rutas dentro del contexto general (Pagany et al., 2019). Dependiendo de que enfoque se le quiere dar para la resolución de este problema pueden variar los resultados, es por esto que esta problemática a día de hoy aún es materia de estudio.

En el trabajo de Cañar (2022), se aborda la adecuada ubicación de electrolineras de carga rápida en la ciudad de Cuenca, considerando el porcentaje de visitas que tiene cada sector de la

ciudad (cantidad de viajes con destino en dicho sector) y las gasolineras existentes en donde irán las electrolineras. A través de una optimización por enjambre de partículas, se definen centros de carga rápida ubicados en las existentes estaciones de servicio. Se establece un número de partículas, se determina una función de coste que relacione las rutas, visitas a sectores y ubicación de los centros de carga, para luego proporcionar el costo mínimo de la función a través de distintas pruebas con diferente número de partículas y ubicación de electrolineras. En el trabajo de Chen et al. (2018) también se desarrolla una optimización por enjambre de partículas, en donde se busca minimizar el costo total y maximizar la capacidad de servicio, considerando el precio del terreno y la capacidad que tenga cada estación para instalar centros de carga rápida para scooters (Chen et al., 2018).

En redes de transporte con grandes distancias, en la solución de Fredriksson et al. (2019) se utiliza una técnica de aproximación iterativa para resolver el problema de Route Node Coverage. El objetivo de este problema es que, dada una red de transporte, o un conjunto de rutas, encuentre el número mínimo de estaciones y sus ubicaciones, para permitir que cada vehículo que transite por una de estas, no se quede sin energía antes de llegar a una electrolinera.

Cuando se instala una central de carga en una subestación eléctrica existen pérdidas de energía de la misma, tal como mencionan Islam et al. (2018). En este estudio se tiene en cuenta que cuando un vehículo eléctrico llega a la estación de carga, se pueden introducir a la red principal diversas corrientes armónicas de distinta magnitud y ángulos de fase en diferentes frecuencias, lo cual repercute en un distinto costo debido a las pérdidas en la red. El problema se basa en seleccionar un vector que contenga la ubicación de todo centro de recarga posible en el espacio, y a través de un algoritmo de optimización de búsqueda binaria, se determina si es que se usa ese centro de recarga en la solución final o no.

Una resolución basada en ruteo de vehículos es la que abordan Sánchez et al. (2022), en donde se revuelve el problema de satisfacer la demanda de un conjunto de clientes considerando el estado de carga de la batería, la capacidad de producto que puede llevar el vehículo y las ventanas de tiempo que se tienen para satisfacer al cliente. Para hacerlo, se propuso una estrategia de agrupamiento utilizando el algoritmo K-Means, con tal de dividir el conjunto de

vértices del grafo dirigido para establecer sitios potenciales para estaciones de recarga (con esto se reduce el esfuerzo computacional) y así en cada uno de estos conjuntos minimizar la distancia recorrida por la flota de vehículos considerando las limitaciones en las rutas y las decisiones sobre que estación utilizar para así resolverlo de manera óptima.

Teniendo en consideración la óptima localización de electrolineras y el ruteo de vehículos eléctricos en un solo problema, se ve abordado en el trabajo de Gatica et al. (2018). En este mediante 4 técnicas heurísticas se busca localizar electrolineras y ver como la ubicación de estas afectan a un problema de ruteo de vehículos eléctricos. De las 4 técnicas utilizadas, la que mejor resultados entrega es K-Means, en la cual se busca localizar al menos 1 electrolinera en sitios donde los clientes estén mayormente agrupados a una corta distancia entre ellos.

Otra técnica relacionada con particionamiento de territorio (mencionada anteriormente) se aborda en el trabajo de Zhu et al. (2022), en donde se busca optimizar la ubicación de electrolineras en Irlanda a través del costo económico y medioambiental al momento de construir las estaciones, para posteriormente considerar costos de recarga y emisiones al momento en que estas ya están instaladas. Para hacerlo, los autores simplifican el territorio de Irlanda en un rectángulo, lo subdividen en rectángulos más pequeños y ajustan la correlación suficiente para satisfacer la demanda de carga utilizando un método de solución basado en algoritmos genéticos (Zhu et al., 2022).

En el trabajo de Li et al. (2022) se propone una estrategia de localización de centros de carga y planeo de rutas para compañías del sector logístico usando un algoritmo genético de dos capas. A través de una simulación de la demanda de carga por parte de estos vehículos en Chengdu, China, se busca localizar de manera más viable los centros de carga para minimizar los costos en el sector logístico. Jordán et al. (2022) proponen usar datos del tráfico, centros de población y datos de aplicaciones de Google que proveen información sobre el tiempo que pasa un individuo en cierto lugar, para así con esto optimizar los posibles puntos de recarga de vehículos eléctricos utilizando algoritmos genéticos. Por último, Karakatič (2021) tiene en consideración tiempos de recargas no lineales, tomando en cuenta los consumos en la red para resolver un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos y ventanas de tiempo usando

un algoritmo genético de dos capas con el objetivo de minimizar distancia, paradas y tiempos de carga.

Centros de carga a base de energías renovables igualmente son estudiados en la literatura, tal como se ve en el trabajo de Ahmad et al. (2021). En este se estima la demanda de carga de los vehículos eléctricos, se evalúa la energía solar esperada del centro de carga y a través de la técnica de optimización “chicken swarm” se ubican óptimamente estos centros de carga.

En la Tabla 1 se presenta el criterio o técnica de localización de electrolineras según lo expuesto en la revisión de Pagany et al. (2019) y los métodos de resolución empleados en cada estudio revisado durante la revisión bibliográfica. Este trabajo se enfocará en abordar la resolución del problema mediante la aplicación de una técnica vinculada a la optimización de la red de transporte, relacionada con la simulación de rutas en el problema y además un análisis de la densidad de la demanda. El objetivo principal consiste en identificar la ubicación óptima de las electrolineras con el propósito de minimizar los costos totales, reducir la longitud de los viajes y disminuir los tiempos de espera asociados a la recarga de los vehículos (Pagany et al, 2019).

Tabla 1: Clasificación de referencias bibliográficas.

Referencia		Criterio o Técnica	Método
Ahmad et al. (2021)	“An enhanced approach to optimally place the solar powered electric vehicle charging station in distribution network”	Densidad de la demanda	Chicken swarm
Andrenacci et al. (2016)	“A demand side aproach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations on metropolitan areas”	Particionamiento del territorio	Clustering
Brooker y Qin (2015)	“Identification of potential locations of electric vehicle supply equipment”	Densidad de la demanda	Técnica de aproximación probabilística
Cañar (2022)	“Análisis para la adecuada ubicación de electrolineras de carga rápida en la ciudad de cuenca”		Optimización por enjambre de partículas

Chen et al. (2018)	“Location optimization for multiple types of charging stations for electric scooters”	Densidad de la demanda/ Particionamiento del territorio	
Fredriksson et al. (2019)	“Optimal placement of Charging Stations for Electric Vehicles in large-scale Transportation Networks”	Optimización de la red de transporte	Técnica de aproximación probabilística
Gatica et al. (2018)	“Efficient Heuristic Algorithms for Location of Charging Stations in Electric Vehicle Routing Problems”	Densidad de la demanda/ Optimización de la red de transporte	Heurísticas y ruteo de vehículos
Islam et al. (2018)	“Optimal location and sizing of fast charging stations for electric vehicles by incorporating traffic and power networks”	Optimización de la red de transporte	Binary lighting search
Jordán et al. (2020)	“Localization of charging stations for electric vehicles using genetic algorithms”	Densidad de la demanda	Algoritmos genéticos
Karakatič (2021)	“Optimizing nonlinear charging times of electric vehicle routing with genetic algorithm”	Optimización de la red de transporte	
Li et al. (2022)	“Public charging station localization and route planning of electric vehicles considering the operational strategy: A bi-level optimizing approach”	Densidad de la demanda/ Optimización de la red de transporte	
Sánchez et al. (2022)	“A Clustering Approach for the Optimal Siting of Recharging Stations in the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows”		Clustering y ruteo de vehículos
Zhu et al. (2022)	“Location optimization of electric vehicle charging stations: Based on cost model and genetic algorithm”	Particionamiento del territorio	Algoritmos genéticos

5. Metodología

En el capítulo 4. Revisión Bibliográfica se exploró el cómo ubicar de forma óptima las estaciones de carga para vehículos eléctricos de manera general. Se vio que la forma en que se determinan esas ubicaciones, según la revisión de Pagany et al. (2019), se pueden dividir en tres categorías: optimizar la red de transporte, analizar la densidad de la población o la demanda y por ultimo las técnicas asociadas al particionamiento del territorio. En este trabajo, como se mencionó anteriormente, se buscará un enfoque de solución aplicando una técnica vinculada a la optimización de la red de transporte y de análisis de la demanda utilizando ruteo de vehículos eléctricos, para así determinar de qué manera ubicar estas estaciones de carga para satisfacer esa demanda, minimizando costes de viaje y tiempo para los usuarios.

En el contexto del enfoque mencionado anteriormente, se plantea primeramente la formulación del problema de optimización a resolver. Luego, este problema debe ser integrado al paquete VRPy, para esto primero se debe añadir una variable de carga que refleje la autonomía del vehículo. Esta variable, con un rango de valores de 0 a 100, representa el nivel de carga del vehículo, donde 100 indica que el vehículo está completamente cargado. Integrando esto al problema de optimización, permitirá modelar el uso de la batería del vehículo y sus correspondientes rutas en función de la autonomía que tiene disponible. Posteriormente, se considerará la necesidad de recarga en las electrolineras como una condicional en el problema de optimización. Todos estos arreglos se hacen debido a que VRPy no incluye un conjunto de variables que le permita resolver problemas para vehículos eléctricos.

5.1. Formulación del problema de optimización (E-VRP: Electric Vehicle Routing Problem)

La formulación de un problema de ruteo de vehículos eléctricos, comparado con un problema de ruteo de vehículos normal (VRP), considera la autonomía limitada de conducción (Li et al. 2022). VRPy no cuenta con esto, puesto que es una librería que solo resuelve problemas de ruteo de vehículos con capacidad limitada. Para lograr que VRPy solucione un problema de ruteo de vehículos eléctricos, es necesario añadir las variables anteriormente mencionadas.

El problema de optimización que resuelve VRPy se muestra en la Ecuación (1). En este el objetivo principal es seleccionar las rutas óptimas (más cortas en distancia) con tal de que en

cada una de estas se visite a cada cliente (nodo) exactamente una vez, para después seleccionar la mejor ruta. Con esto en consideración, la formulación del problema de optimización se muestra a continuación.

Sea $G = (V, A)$ un grafo dirigido, donde V representa el conjunto de nodos a visitar ($V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$) y A el conjunto de aristas para visitar dichos nodos. Cada arco $(i, j) \in A$ tiene asociado un costo c_{ij} dado por la distancia que existe entre nodo i con el nodo j (Toth y Vigo, 2002). Definiendo x_{ij} como una variable binaria que toma el valor 1 si es que se escoge el arco que une al nodo i con el nodo j , la función objetivo se ve en la Ecuación (12).

$$\min \sum_{i,j \in V', i \neq j} c_{ij} x_{ij} \quad (12)$$

En donde V' representa la unión de nodos a visitar junto al nodo bodega ($\{0\}$) y el conjunto electrolinera ($F = \{v_{n+1}\}$) (Erdoğan y Miller-Hooks, 2012). Esta función, busca minimizar la distancia total recorrida por el vehículo. Las restricciones asociadas a esta función objetivo se muestran a continuación.

$$\sum_{i \in V'} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V' \quad (13)$$

$$\sum_{j \in V'} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V' \quad (14)$$

Las restricciones de las ecuaciones (13) y (14) imponen que, de cada nodo, entre y salga sólo un arco (Toth y Vigo, 2002). Se incluye la bodega, esto implica que sólo se utiliza un vehículo.

$$EDC_j = EDC_i - \hat{c}_{ij} x_{ij}, \forall j \wedge i \in V, i \neq j \quad (15)$$

$$EDC_j \geq 0, \quad \forall j \in V' \quad (16)$$

Definiendo EDC como la variable del estado de carga del vehículo y $\hat{c}_{ij}$ como el costo en carga que se tiene de ir desde el nodo i al j , la restricción de la Ecuación (15) actualiza el estado de carga cada vez que se avance en el grafo y no se llegue a una electrolinera (Erdoğan y Miller-Hooks, 2012). La restricción de la Ecuación (16) impide que se llegue a un nodo (cualquiera) con carga negativa.

$$EDC_j = 100, \quad \forall j \in F \quad (17)$$

La restricción de la Ecuación (17) actualiza el estado de carga para cuando el vehículo llegue a la electrolinera.

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset V', 2 \leq |S| \leq |V'| - 1 \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j \in A \quad (19)$$

Denotando S como un subconjunto de nodos, la restricción de la Ecuación (18) elimina todas las soluciones que contengan subtours, “haciendo que el número máximo de arcos para cada subconjunto S posible sea igual o mayor al número de nodos dentro de ese subconjunto” (De Giovanni y Di Summa, s.f.). Ya formulado el problema de optimización a resolver, en el siguiente capítulo se integran las restricciones asociadas a la variable de carga del vehículo y las electrolineras al código interno del paquete VRPy.

5.2. Implementación del problema de optimización en VRPy

5.2.1. Integración de variable de carga a VRPy

En el paquete VRPy se pueden integrar atributos de costo y tiempo entre aristas, como se ve en la Figura 4. Para este caso en particular, se puede hacer ayuda de estos dos atributos para la integración del que está asociado a la carga de los vehículos.

```
from networkx import DiGraph
G = DiGraph()
for v in [1, 2]:
    G.add_edge("Source", v, cost=10,time=5)
    G.add_edge(v, "Sink", cost=10,time=5)
G.add_edge(1, 2, cost=40,time=20)
G.add_edge(2, 1, cost=10,time=5)
```

Figura 4: Integración de atributos de costo y tiempo en un grafo dirigido en VRPy.

Considerando que el atributo costo entre dos aristas es la distancia que existe entre ellas y el atributo tiempo es lo que demora en recorrer dicha distancia, se introduce el atributo de carga ($\hat{c}_{ij}$), el cual se resta de la autonomía del vehículo de ir de un punto a otro. Para introducir este atributo al problema de optimización se incorpora la variable EDC (estado de carga) y la variable batería_inicial. La primera de estas especifica la carga máxima que pueden utilizar los vehículos en su ruta. La segunda, es un número entero que va de 0 a 100 que especifica la carga

con la que sale el vehículo de la bodega (o con la que sale de la electrolinera). Con esto, se establece que el costo total en energía del problema no debe exceder la capacidad total de carga del vehículo (EDC) y, además, no debe ser inferior a 0.

$$0 \leq EDC \leq 100 \quad (20)$$

$$bateria_{inicial} \in \{0, 1, 2, 3, \dots, 100\} \quad (21)$$

Tal como se mencionó anteriormente, se define $\hat{c}_{ij}$ como el costo en carga que se tiene de ir desde el nodo i hacia el nodo j (atributo de carga) y x_{ij} como una variable binaria, donde x_{ij} es 1 si se selecciona la arista que une al nodo i con el nodo j y 0 en caso contrario, la restricción EDC se encuentra representada en la Ecuación (22).

$$EDC = bateria_{inicial} - \sum_{i \neq j} \hat{c}_{ij} x_{ij} \quad (22)$$

Al incorporar esta restricción al código, se lleva a cabo un ejemplo expuesto en Anexo 2.

5.2.2. Integración de electrolineras a VRPy

Para la integración de electrolineras se añade el atributo recharge, el cual busca recargar la batería que se ha utilizado hasta llegar a dicho nodo. Para lograr esto, se busca que en el momento en que el nodo j sea la electrolinera, EDC sea igual a 100. Una vez sucede esto, la variable batería_inicial es igual a 100 y la sumatoria que representa la resta de energía de ir desde el nodo i al nodo j es igual a 0. La integración de electrolineras en el código interno de VRPy se ilustra en el siguiente pseudocódigo.

```

función_restricciones_cumplidas(nodo_existente, nodo_nuevo):
    if total_charge:
        if nodo_nuevo == "recharge":
            EDC+=100
            if EDC ≥ 100:
                EDC == 100

```

Con esto se asegura que la restricción EDC siempre sea menor o igual a 100. La aplicación de la electrolinera se ve en el ejemplo expuesto en Anexo 2.

5.3. Pruebas de localización de electrolineras

5.3.1. Evaluación de los casos de estudio

La evaluación de los casos de estudio es un paso previo fundamental para determinar la ubicación de las electrolineras. Esta evaluación se basa en tres factores que toman gran importancia en la toma de decisiones para la implementación de una infraestructura de carga eficiente.

- **Tráfico Vehicular:** La densidad del tráfico vehicular es un factor importante en la toma de decisiones. En zonas de alto flujo vehicular es probable que se satisfaga una gran parte de la demanda de carga de vehículos eléctricos, pero puede existir una saturación en la electrolinera que aumente aún más la congestión. Por otra parte, en zonas de bajo flujo vehicular es probable que no se utilicen en demasía. Una mezcla de ubicaciones en zonas de alto y bajo flujo vehicular permitirá garantizar una mejor cobertura de carga.
- **Vehículos eléctricos en la zona:** Si bien a día de hoy la cantidad de vehículos eléctricos en Chile no es muy grande, tener una estimación de la cantidad que ya existe ayudará a saber la demanda existente y futura de energía.
- **Electrolineras ya existentes:** Conocer la infraestructura ya existente evitará generar una saturación de estas en zonas en donde ya se puede satisfacer de la demanda de carga de los vehículos.

La elección de estos factores se basa en la sección 4. Revisión Bibliográfica, con tal de aplicar la técnica vinculada a la optimización de la red de transporte teniendo una estimación de los patrones de destino comunes a través del análisis del tráfico vehicular, además de considerar una estimación la demanda en la zona del caso de estudio teniendo la cantidad de vehículos eléctricos en la zona y las electrolineras ya existentes. De esta manera se busca ubicar de manera óptima las electrolineras para así satisfacer la demanda por parte de los vehículos eléctricos.

En cuanto al acceso al recurso energético se refiere, se supondrá que toda zona céntrica de la ciudad eventualmente tendrá que reforzar las redes de distribución en función de las futuras necesidades que constituya la instalación de futuros centros de recarga para vehículos eléctricos, en este caso, electrolineras.

5.3.2. Criterio de decisión

Con los datos de los vehículos eléctricos en la zona y las electrolineras ya existentes se define el número de estas a instalar. Este número está dado por la razón de cargadores por vehículo eléctrico en la zona. En la región Metropolitana el año 2021 circulaban 1288 vehículos eléctricos, y la infraestructura de carga existente eran de 256 puntos de carga AC y 25 de tipo DC, lo cual establecía una razón de 0,22 cargadores por vehículo (Taborelli, 2021) (Ecuación 23). Tener un caso base en donde se sabe qué relación existe en cuanto a cargadores existentes por vehículo en la zona sirve para tener una estimación de que tanta oferta (electrolineras) es necesaria para satisfacer la demanda.

$$R_{cv} = \frac{256 \text{ cargadores AC} + 25 \text{ cargadores DC}}{1288 \text{ vehiculos}} = 0,22 \frac{\text{cargador}}{\text{vehiculo}} \quad (23)$$

La relación cargador/vehículo deseada para este trabajo es de 0,1. Sabiendo la cantidad de electrolineras existentes y teniendo una estimación de la cantidad de vehículos eléctricos presentes en cada caso de estudio, se puede obtener a través de esta relación la cantidad de nuevas electrolineras a instalar. Posteriormente, se definirán ubicaciones potenciales a instalar electrolineras teniendo en consideración cruces en zonas de alto y bajo tráfico vehicular. Teniendo todas las ubicaciones potenciales a instalar electrolineras, la técnica a emplear consta de 4 pasos:

1. Ubicar una electrolinera en un punto de la zona del caso de estudio.
2. Definir cuatro instancias en el caso de estudio.
3. Resolver y totalizar el costo en distancia, tiempo y carga utilizada por este vehículo para realizar cada instancia.
4. Modificar la ubicación de la electrolinera.

La definición de una instancia en un escenario real para su integración en VRPy se expone a continuación. En la primera etapa, se obtiene el mapa de la zona a analizar mediante el uso de la función "graph_from_address" de la biblioteca OSMnx. Esta función se emplea para descargar y construir grafos a partir de datos proporcionados por OpenStreetMap. En la función, se

especifica la dirección del lugar, el tipo de red de calles a analizar y el nivel de zoom para el área designada, para así obtener un mapa tipo grafo tal como se ve en la Figura 5.

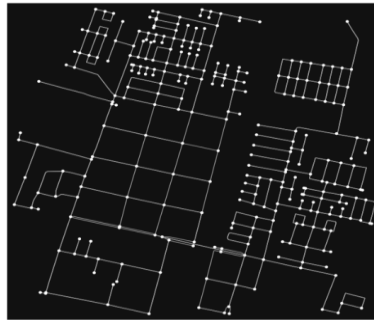


Figura 5: Mapa de zona a analizar en formato de grafo

En este escenario, se dispone de un mapa compuesto por 298 nodos. En el caso en que se quieran visitar cierto par de nodos, el primer paso es calcular la ruta más corta entre cada par de estos con la función “distance.shortest_path” de la biblioteca OSMnx. Después de obtener las rutas entre nodos y sus distancias correspondientes, se proporciona al algoritmo VRPy un grafo simplificado de este escenario (Figura 6), el cual debe ser un grafo dirigido en donde se especifique el nodo bodega y los nodos a visitar.

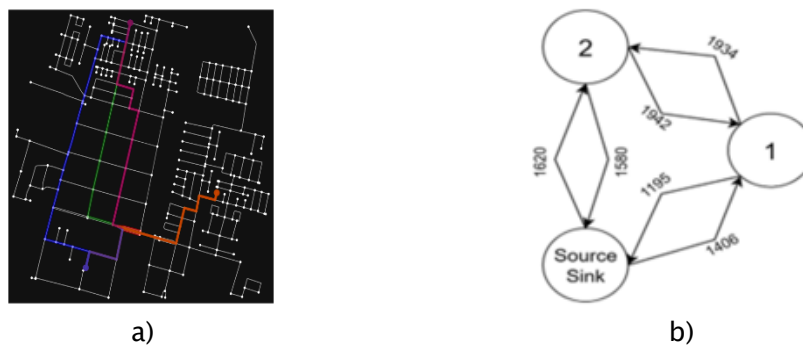


Figura 6: Escenario en problema de ruteo. a) Vista en modo mapa tipo grafo, b) Grafo dirigido.

Se entrega a VRPy este grafo dirigido y se resuelve empleando los 3 algoritmos descritos en los capítulos 3.3. VRPy y 3.4. Algoritmo de ahorros de Clarke y Wright.

```

import vrpy
prob = vrpy.VehicleRoutingProblem(grafu,num_vehicles=1)
prob.solve()
✓ 12.0s

INFO:vrpy.vrp:Clarke & Wright solution found with value 4757 and 1 vehicles
INFO:vrpy.vrp:Greedy solution found with value 4920 and 1 vehicles
INFO:vrpy.vrp:iteration 0, 4757.0
INFO:vrpy.vrp:iteration 1, 4757.0
INFO:vrpy.vrp:iteration 2, 4757.0
INFO:vrpy.master_solve_pulp:total cost = 4757.0

```

Figura 7: Resultado a problema de ruteo.

Para definir un problema de ruteo para un vehículo eléctrico el análisis es similar, solo que en este caso se debe añadir la restricción ligada a la carga del vehículo, la carga utilizada para recorrer cada arista y la electrolinera de por medio en el mapa. Este procedimiento se ve a continuación.

El primer paso es definir un problema de ruteo similar al anterior, pero añadiendo la restricción de carga, en esta se define el límite de batería para usar en el recorrido, tal como se ve en la Figura 8.

```

import vrpy
prob = vrpy.VehicleRoutingProblem(grafu,num_vehicles=1)
EDC=100

```

Figura 8: Adición de variable asociada a la carga del vehículo.

La forma en que se resta la batería del vehículo viene definida por el costo en distancia que tiene el ir de un nodo a otro (en metros), dividido por el factor de autonomía del mismo (Ecuación (24)).

$$\text{porcentaje de carga usado} = \frac{\text{Distancia entre nodos (en metros)}}{\text{km de autonomia} \cdot 10} \quad (24)$$

Por ejemplo, en el siguiente caso se tiene una distancia entre nodos de 1934 metros, si se define una autonomía de 20 km, el porcentaje de carga utilizado para realizar ese recorrido es de 9,67% (Figura 9).

```

G.add_edge(nodo1, nodo2, cost=1934,charge=(cost/200))
print(charge)
✓ 0.3s

9.67

```

Figura 9: Carga utilizada para ir de nodo1 a nodo2.

Para añadir una oportunidad de recarga en el mapa, se debe añadir el nodo correspondiente a la electrolinera, tal como se ve en la Figura 10. Al igual que en el caso anterior, se deben calcular las distancias entre todos los pares de nodos en el problema.

```
grafu.add_node(electrolinera)
grafu.nodes[electrolinera]["recharge"]=100
✓ 0.0s
```

Figura 10: Adición de electrolinera al problema.

Es importante tener en consideración de que, al momento de añadir una electrolinera al problema, esta debe ser visitada por el vehículo eléctrico debido a restricciones de visita de nodos del problema maestro que resuelve VRPy.

Ya definiendo una instancia de ruteo en un escenario real para su integración en VRPy, se emplea la técnica de 4 pasos anteriormente expuesta. Al iterar varias veces esta, en base a la cantidad de electrolineras de prueba a utilizar, se llena una tabla en que se vea el costo en distancia, tiempo y carga de cada recorrido. Evaluando una función de costo que pondere el conjunto de recorridos más rápido y con menor consumo energético, se determina que en la ubicación en donde estos recorridos son más rápidos y el costo en consumo energético es menor, conviene ubicar una electrolinera, tanto para el caso en que se evalúan electrolineras en zonas de alto tráfico vehicular como en zonas de bajo tráfico vehicular, pues tal como se menciona en la sección 5.3.1. Evaluación de los casos de estudio, una mezcla de estas ayuda a obtener una mejor cobertura de carga. En resumen, la metodología propuesta queda expuesta en la Figura 11.



Figura 11: Metodología propuesta.

6. Casos de estudio y resultados

Los casos de estudio propuestos para abordar esta problemática se desarrollan en dos ubicaciones distintas. El primero toma lugar en la conurbación Rancagua–Machalí, mientras que el segundo se enfoca en la comuna de Providencia, Santiago. Cada uno de estos casos se abordará de manera individual, con el objetivo de evaluar cómo la metodología propuesta impacta en lugares donde la distancia entre nodos es mayor, en contraste con aquellos donde las distancias son menores.

6.1. Ruta Rancagua–Machali

El primer caso de estudio que se plantea abordar toma lugar en las rutas que unen a la ciudad de Rancagua con la comuna de Machalí. Estas rutas son principalmente 3, Av. Libertador Bernardo O'Higgins con Av. San Juan, Av. Miguel Ramírez con Av. San Juan y Carretera del Cobre con calle Las Higueras (Figura 12). Las 3 rutas en promedio tienen una distancia de 10 km.

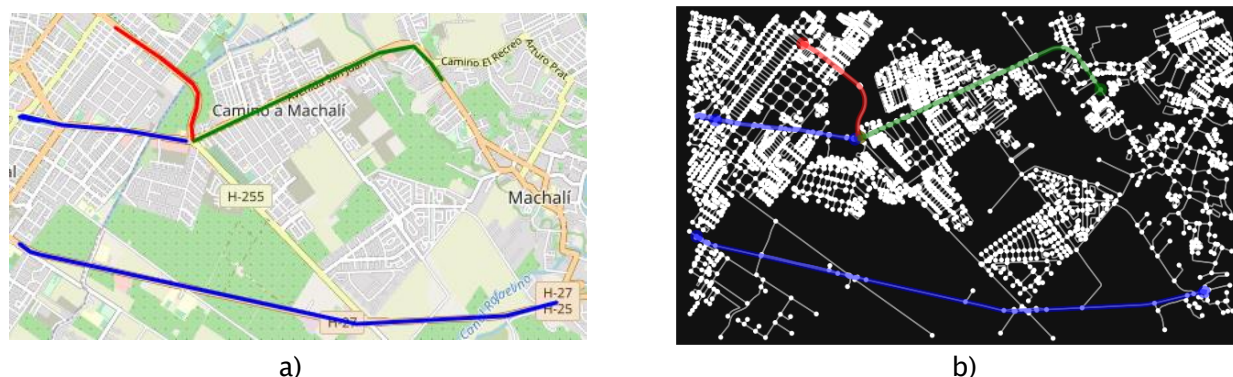


Figura 12: Principales rutas de acceso a Machalí o Rancagua. a) Vista en modo mapa, b) Vista en modo grafo.

Estas distancias pueden resultar ser algo extensas y costosas en cuanto a tiempo se refiere debido a la congestión vehicular que enfrentan los usuarios de estas vías. La mayoría de estos vehículos son a base de combustibles fósiles, por esto es necesario ubicar estratégicamente los centros de carga de vehículos eléctricos para fomentar su uso y así aumentar la movilidad sostenible.

6.1.1. Tráfico vehicular

Según datos de SURPLAN (2020), las vías con mayores volúmenes de carga vehicular en horario punta son la ex Ruta 5, Carretera del Cobre y la Av. Miguel Ramírez (Figura 13).

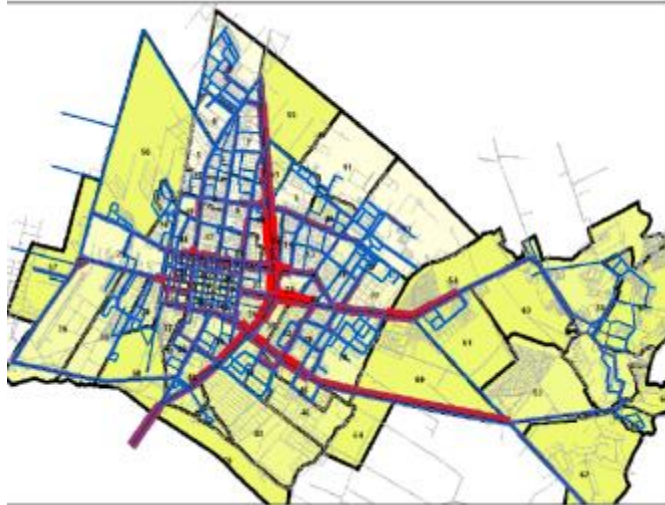


Figura 13: Carga Vehicular de la red vial [Estudio “Actualización y Seguimiento de Planes Estratégicos del STU Rancagua” (2011)], como se citó en SURPLAN (2020).

Se destaca que Av. República de Chile también presenta una alta congestión vehicular, debido a que es una vía que da conectividad a la zona céntrica de la ciudad (SURPLAN, 2020). En Trans O’Higgins (2021) se destaca que en la conurbación Rancagua–Machalí por Av. San Juan en horario punta (7:15 a 8:00) circulan cerca de 4500 vehículos, y en Carretera del Cobre la media es de 2800 vehículos en el mismo horario. El aumento del parque vehicular para el año 2028 estima que en Rancagua existirán 109578 vehículos de transporte particular, lo cual interfiere directamente con un aumento en la congestión vehicular en las zonas ya mencionadas.

6.1.2. Vehículos eléctricos en la zona

Si bien, no hay un número exacto de vehículos eléctricos y/o híbridos en Rancagua, se espera que para el año 2024 existan 155 vehículos totalmente eléctricos (Universidad De O’Higgins, 2023). Esta es una estrategia impulsada por el Ministerio de Energía y la región de O’Higgins llamada “Mi colectivo eléctrico”, la cual busca cofinanciar a dueños de colectivos a base de combustibles fósiles para adquirir vehículos 100% eléctricos.

6.1.3. Centros de carga existentes

Según datos de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, entre Rancagua y Machalí existen 4 puntos de carga públicos, los cuales cuentan con un cargador cada uno, pero con la disponibilidad de abastecer vehículos que tengan distinto tipo de conector (datos de

potencia de cada electrolinera, cargadores y conectores se encuentra en Anexo 3). La distribución espacial de estos se ve en la Figura 14.

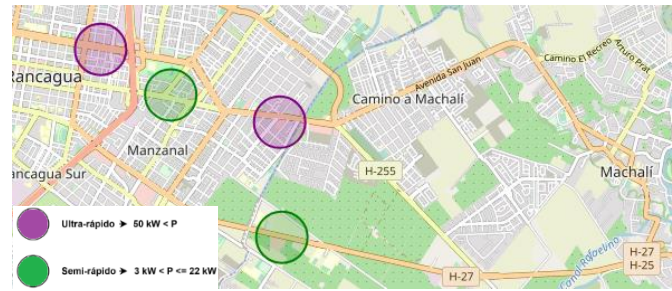


Figura 14: Puntos de carga públicos en Rancagua-Machalí.

Con los datos obtenidos del apartado de vehículos eléctricos en la zona del caso de estudio y electrolineras ya existentes, el número de estas está dado por (Ecuación (25)):

$$R_{cv} = \frac{4 \text{ cargadores} + x \text{ cargadores}}{155 \text{ vehiculos}} = 0,1 \frac{\text{cargador}}{\text{vehiculo}} \quad (25)$$

De la Ecuación (25), se necesitan de 12 cargadores más para llegar a la relación cargador/vehículo de 0,1. Estos estarán en 6 electrolineras, cada una contara con 2 cargadores que puedan entregar un suministro hasta los 50 kW.

6.1.4. Pruebas de localización de electrolineras

Dentro de la conurbación se escogieron 26 posibles ubicaciones de electrolineras, 13 ubicadas en zonas de alto tráfico y 13 en zonas de bajo tráfico. Estas se ven en la Figura 15.



Figura 15: Ubicaciones de electrolineras en Rancagua-Machalí. a) Zonas de alto tráfico, b) zonas de bajo tráfico.

Las 26 electrolineras están numeradas del 1 al 13 para cada caso (alto tráfico y bajo tráfico). Comenzando con la metodología propuesta, se comienza escogiendo la ubicación de la electrolinera 1 de zonas de alto tráfico vehicular.

Luego, se definen cuatro instancias que unan a la ciudad de Rancagua con la comuna de Machalí para probar la ubicación de la electrolinera 1. Estas instancias se componen de la visita a 10 nodos distintos entre Rancagua y Machalí. La definición de estas se ven representadas en la Figura 16.



Figura 16: Instancias de ruteo entre Rancagua y Machalí.

Las visitas a los nodos tienen como punto de partida y fin la instalación de Correos de Chile, ubicada en la esquina que une a C. Cuevas con Campos. La autonomía para cada instancia y la velocidad promedio queda expuesta en Anexo 4. Una vez definido esto, se resuelve cada una de las 4 instancias utilizando el enfoque generación de columnas y el algoritmo de Clarke y Wright presentado en la sección 3.4. Se registra la distancia total recorrida, el tiempo utilizado y la carga utilizada para hacer el recorrido. La resolución de la instancia 1 utilizando la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular se ve en la Figura 17.

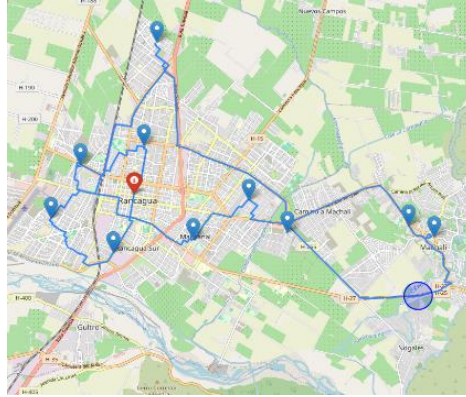


Figura 17: Solución instancia 1 con electrolinera 1 en zona de alto tráfico (Distancia: 47,7 km, Tiempo: 158,3 min, Carga: 113,7%).

En el siguiente paso de la metodología propuesta, se procede a ajustar la ubicación de la electrolinera en el mapa para resolver nuevamente cada instancia, totalizando los costos en distancia, tiempo y carga para cada una de estas.

Una vez completada la técnica propuesta con todas las ubicaciones de prueba de electrolineras, el conjunto óptimo de estas que permite establecer una ruta con menor costo, tiempo y carga se determina mediante la suma de estos tres parámetros. Los resultados de este análisis se presentan en los gráficos de la Figura 18. Los resultados detallados se presentan en Anexo 5.1 para las electrolineras situadas en zonas de alto tráfico y en Anexo 5.2 para aquellas en zonas de bajo tráfico.

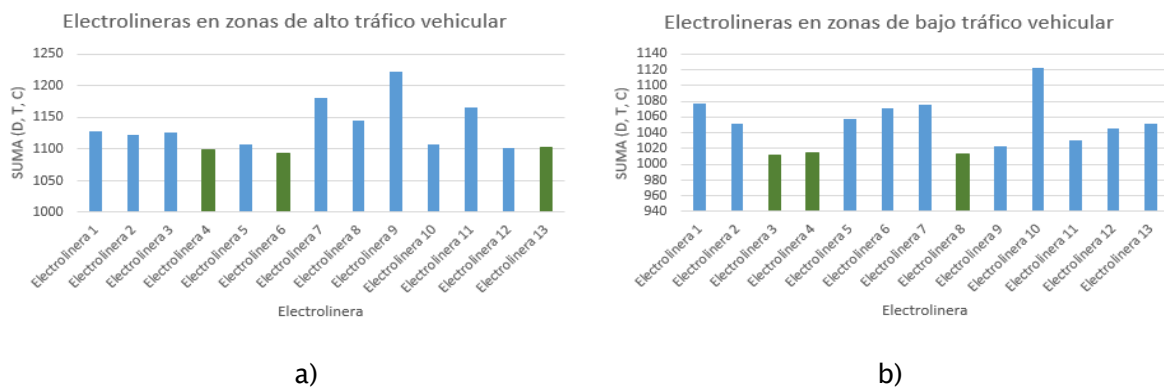


Figura 18: Graficas de la suma en distancia, tiempo y carga de todas las rutas usando todas las electrolineras. a) Electrolineras ubicadas en zonas de alto tráfico, b) Electrolineras ubicadas en zonas de bajo tráfico vehicular.

En la Tabla 2 se presenta el promedio de las 4 instancias en recorrer la ruta en distancia, tiempo y carga con las electrolinerías seleccionadas como óptimas en comparación con las otras electrolinerías de prueba (definidas como no óptimas para la comparación).

Tabla 2: Tabla comparativa en promedio para electrolinerías óptimas en zonas de alto y bajo tráfico vehicular en ruta Rancagua–Machalí. (D: distancia en km, T: tiempo en minutos, C: carga en porcentaje).

Electrolinerías Ubicación	Electrolinerías óptimas			Electrolinerías no óptimas		
	D	T	C	D	T	C
Alto tráfico vehicular	39,2	128,1	107,1	45,4	148,1	123,2
Bajo tráfico vehicular	38,7	108	106,5	45,2	125,1	124,3

La ubicación de las seleccionadas como óptimas junto a las ya existentes se ven en la Figura 19.

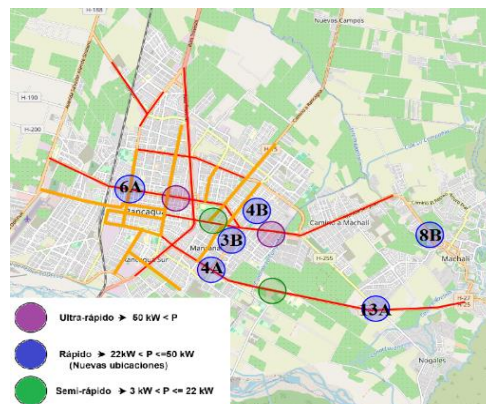


Figura 19: Ubicaciones de electrolinerías nuevas y existentes en ruta Rancagua–Machalí

Se seleccionan tres electrolinerías ubicadas en zonas de alto tráfico vehicular y tres en zonas de bajo tráfico vehicular, lo que permite garantizar una amplia cobertura de carga, evitando saturar aquellos sitios que ya lo están.

6.2. Providencia

El siguiente caso de estudio para validar la metodología propuesta toma lugar en la comuna de Providencia, Santiago (Figura 20). Las distancias que existen entre un punto y otro pueden ser más cortas en comparación con el caso Rancagua–Machalí, pero la densidad de

población y cantidad de vehículos que transitan por esta comuna es sin dudas superior, influyendo directamente en los tiempos que toma el llegar de un punto a otro.



Figura 20: Comuna de Providencia, Santiago. a) Vista en modo mapa, b) Vista en modo grafo.

6.2.1. Tráfico vehicular

Providencia, al ser una comuna céntrica en la ciudad de Santiago atrae una gran cantidad de viajes, y es que, según un estudio realizado por la municipalidad de la misma, un 80% de los viajes lo realizan usuarios no pertenecen a dicha localidad. En este, también se estima que para el año 2030 no existirá capacidad vial para recibir el parque vehicular futuro, ya que actualmente en horas punta (mañana y tarde) la red está al límite de su capacidad (Municipalidad de Providencia, 2023). Los cruces con mayor saturación en la comuna son Salvador, José Manuel Infante, Hernán Alessandri, Eliodoro Yáñez y Rancagua/Salvador (Figura 21).

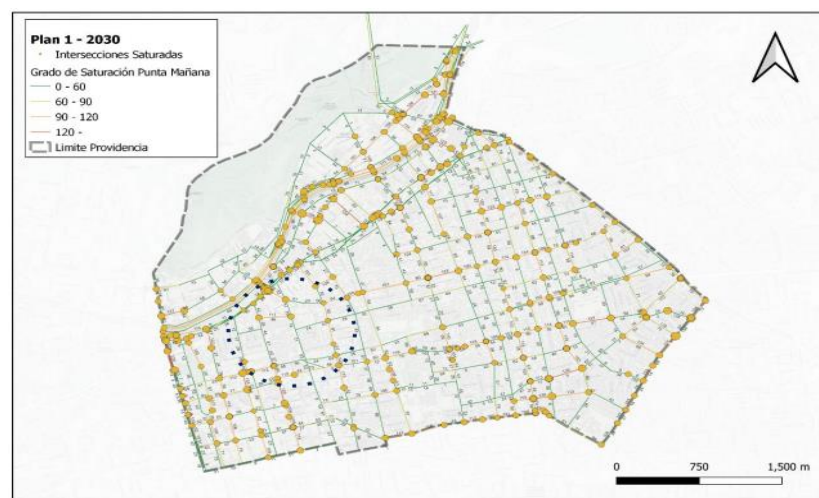


Figura 21: Intersecciones saturadas para 2030 en Providencia (Municipalidad de Providencia, 2023).

6.2.2. Vehículos eléctricos en la zona

Para calcular la cantidad de vehículos eléctricos que circulan diariamente por la comuna de Providencia, se emplea una estimación basada en el total de vehículos eléctricos en la Región Metropolitana y el porcentaje de desplazamientos que se hacen en la zona por residentes de otras comunas. Según información proporcionada por la Asociación Nacional Automotriz de Chile, las ventas acumuladas de vehículos aptos para utilizar energía eléctrica, alcanzan la cifra de 4610 alrededor en todo el país. Teniendo en consideración que Taborelli (2021) detalla que cerca del 65% de vehículos eléctricos se encuentra en la Región Metropolitana (en el año 2021), se estima que actualmente circulan alrededor de 2996 vehículos con capacidad de usar energía eléctrica para su uso. En el estudio vial de la comuna se detalla que un 80% de los viajes que se realizan en la comuna son por usuarios que no viven en la misma, por lo tanto, se puede estimar que diariamente podrían circular 2396 vehículos eléctricos por la comuna.

6.2.3. Centros de carga existentes

En comparación con Rancagua-Machalí, la infraestructura de carga en la comuna de Providencia es considerablemente más extensa, como se ve en la Figura 22. Actualmente, cuenta con 16 puntos de carga, compuestos por 31 cargadores semi-rápidos (con una potencia no superior a 22 kW) y un cargador ultra-rápido (potencia mayor a 50 kW). La mayoría de estos cargadores utilizan el conector T2SC, a excepción de los 2 ubicados en Costanera Center, que emplean conectores T1 y T2.

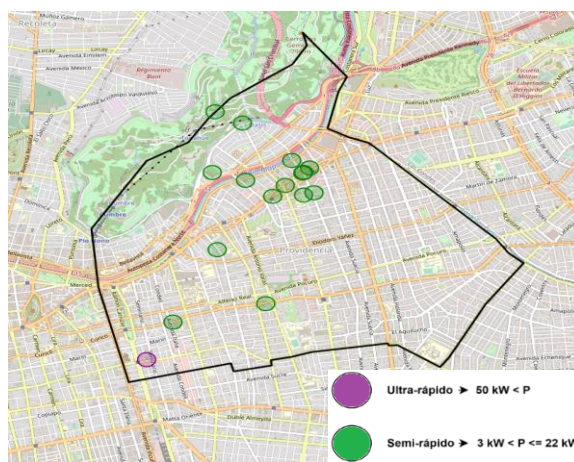


Figura 22: Puntos de carga existentes en Providencia.

En total, solamente en Santiago hay 529 cargadores disponibles del total de 542 de la Región Metropolitana (Superintendencia de Electricidad y Combustibles, 2023), lo cual da una relación cargador/vehículo mayor a 0,1 (Ecuación (26)).

$$R_{cv} = \frac{529 \text{ cargadores}}{2996 \text{ vehiculos}} = 0,17 \frac{\text{cargador}}{\text{vehiculo}} \quad (26)$$

Por lo cual, el número de cargadores a instalar en Providencia estará solamente ligado a aumentar en un 50% su capacidad ya instalada, es decir, 8 electrolineras con dos cargadores de 50 kW cada uno para satisfacer la futura demanda en la Región Metropolitana.

6.2.4. Pruebas de localización de electrolineras

Las pruebas de localización de electrolineras toman lugar en 36 ubicaciones distintas, 18 estarán situadas en zonas de alto tráfico vehicular y 18 en zonas de bajo tráfico vehicular (Figura 23).

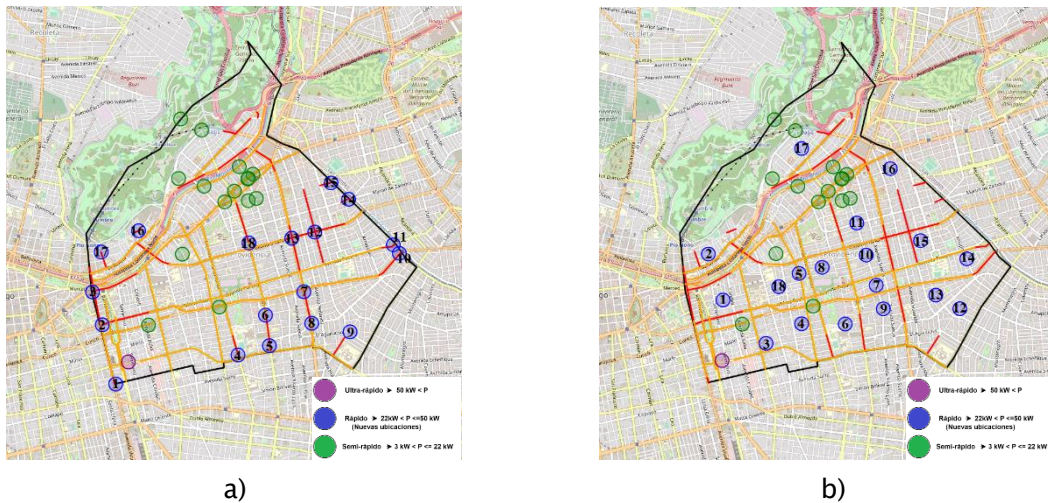
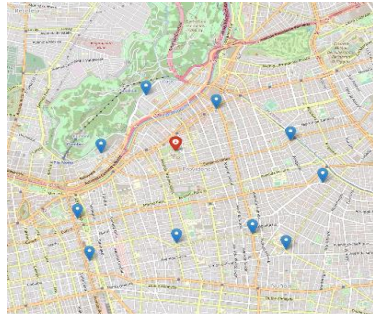
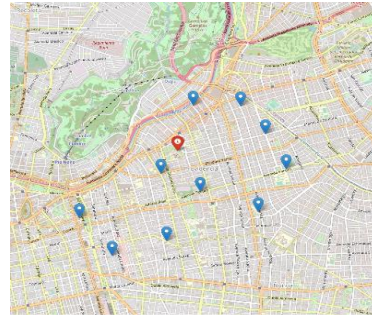


Figura 23: Ubicaciones de electrolineras en Providencia. a) Zonas de alto tráfico, b) zonas de bajo tráfico.

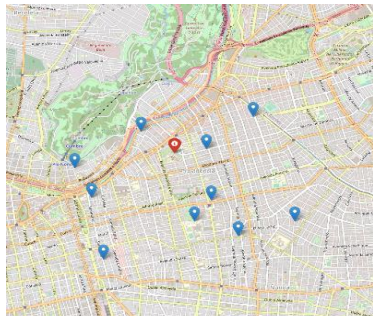
De acuerdo a la metodología propuesta, se comienza escogiendo la ubicación de electrolinera 1 de zonas de alto tráfico vehicular. Luego, se definen 4 instancias de ruteo que recorran la comuna de Providencia. Estas instancias se componen de la visita a 10 nodos distintos entre la comuna, tal como se ve en la Figura 24.



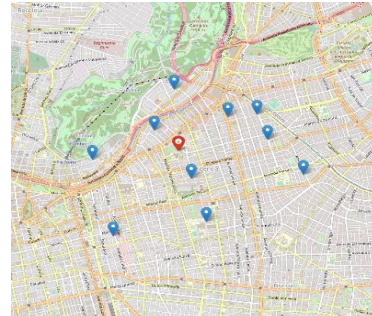
Instancia 1



Instancia 2



Instancia 3



Instancia 4

Figura 24: Instancias de ruteo en Providencia.

Las visitas a estos nodos tienen como punto de partida y fin el centro del mapa, el cual está ubicado en el Hospital Luis Calvo Mackenna. La autonomía utilizada para resolver cada instancia y la velocidad promedio se ve detallada en Anexo 4. Se resuelve cada instancia utilizando el enfoque de generación de columnas y la heurística de ahorros de Clarke y Wright. Al igual que en el caso anterior, en cada ruta se registra la distancia total recorrida, el tiempo que demoró en recorrer la ruta y la carga total utilizada. En la Figura 25 se ve la resolución de la instancia 1 utilizando la electrolinera 1 en zona de alto tráfico y se registran estos parámetros.

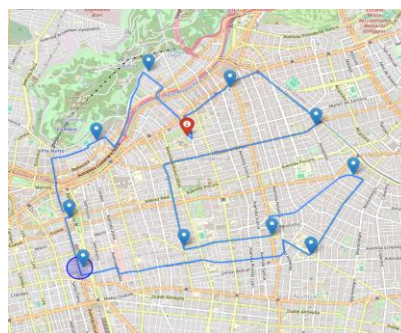


Figura 25: Solución instancia 1 con electrolinera 1 en zona de alto tráfico en Providencia (Distancia: 22,9 km, Tiempo: 83,9 min, Carga: 134,9%).

Los resultados de ambos casos, tanto para electrolinerías situadas en zonas de alto tráfico vehicular como en zonas de bajo tráfico vehicular se presentan en Anexo 5.3 y Anexo 5.4 respectivamente. Una vez se tienen todos los datos, el conjunto óptimo de electrolinerías que permite establecer una ruta con menor costo, tiempo y carga se presentan en las gráficas de la Figura 26.

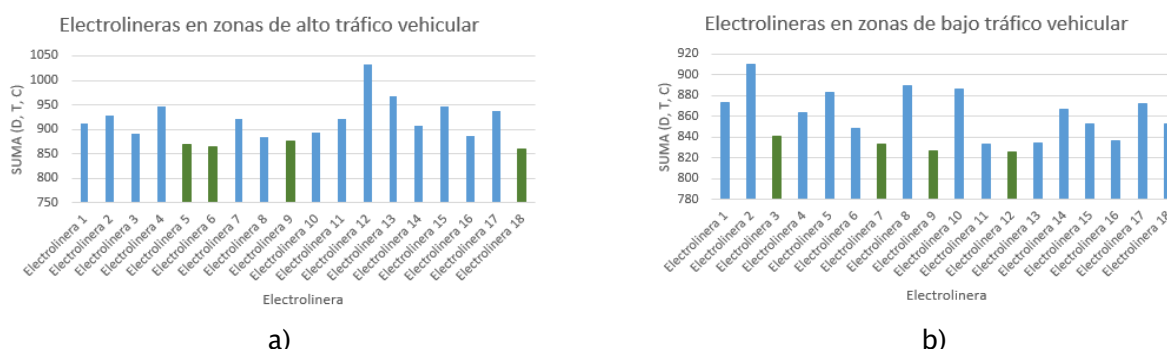


Figura 26: Gráficas de la suma en distancia, tiempo y carga para cada electrolinería. a) Electrolinerías ubicadas en zonas de alto tráfico, b) Electrolinerías ubicadas en zonas de bajo tráfico vehicular.

Al igual que en el caso de estudio 6.1. Ruta Rancagua–Machalí, en la Tabla 3 se presenta el promedio de las cuatro instancias en recorrer la ruta en distancia, tiempo y carga con las electrolinerías seleccionadas como óptimas en comparación con las otras electrolinerías.

Tabla 3: Tabla comparativa en promedio para electrolinerías óptimas en zonas de alto y bajo tráfico vehicular en Providencia. (D: distancia en km, T: tiempo en minutos, C: carga en porcentaje).

Electrolinerías Ubicación	Electrolinerías óptimas			Electrolinerías no óptimas		
	D	T	C	D	T	C
Alto tráfico vehicular	21,1	78,1	117,7	22,5	83,3	125,8
Bajo tráfico vehicular	21,3	66,2	120,3	22,2	68,4	125,3

Las ubicaciones de estos 8 nuevos puntos de carga en la comuna de Providencia se ven en la Figura 27.

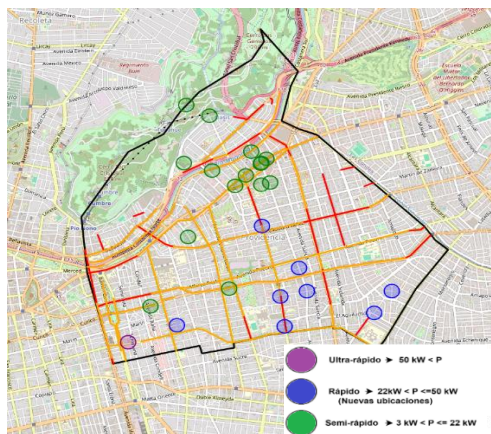


Figura 27: Ubicaciones de electrolineras que minimizan distancia, tiempo y carga en Providencia.

Se seleccionan cuatro electrolineras para cada caso, puesto que, al igual que en capítulo 6.1. Ruta Rancagua–Machalí, se busca garantizar una amplia cobertura de carga evitando saturar aún más aquellos sitios que ya lo están.

6.3. Análisis de ambos casos

En este análisis, al crear situaciones (instancias) en donde es necesario utilizar una electrolinera de por medio debido a la restricción de carga, se puede obtener un estimativo de cuánto tiempo y carga se ahorra con las electrolineras escogidas como óptimas para resolver cada instancia. Para el caso ubicado en la conurbación Rancagua–Machalí, las ubicaciones de electrolineras escogidas como óptimas en zonas de alto tráfico vehicular permiten completar las instancias con un menor costo energético y en menos tiempo. En promedio, el ahorro en batería es de un 3,03% y en tiempo es de 3,9 minutos al realizar el recorrido en comparación con las electrolineras no óptimas en el análisis de zonas de alto tráfico vehicular. Para el caso de las ubicaciones óptimas en zonas de bajo tráfico vehicular, el ahorro promedio en carga es de 4,1% y en tiempo es de 3,54 minutos por ruta en comparación con las electrolineras no óptimas en esas zonas. En la instancia 3, al utilizar la electrolinera óptima número 4, se ve un ahorro del 0,6% en batería en comparación con no tenerla en la ruta

Para el caso de Providencia, las 4 electrolineras óptimas situadas en zonas de alto tráfico vehicular permiten completar las instancias con un ahorro en promedio en batería del 6,39%, al mismo tiempo que reducen el tiempo promedio en 4,05 minutos en comparación con las otras

ubicaciones. Para el caso de las electrolineras situadas en zonas de bajo tráfico vehicular, estas permiten completar las rutas con un ahorro en carga y tiempo de 3,95% y 1,73 minutos respectivamente por ruta. Para la instancia 4 usando la electrolinera número 3, se ahorra un 0,8% en batería en comparación con no utilizarla en la solución.

En ambos casos, la distribución espacial de las electrolineras escogidas como óptimas ayuda a llenar de manera eficaz espacios vacíos en el territorio, contribuyendo a esparcir la cantidad de vehículos eléctricos que podrían estar concentrados en un solo sitio debido a la infraestructura de carga existente, tal como se ve en la Figura 22. En este caso hay una sola zona que concentra una gran cantidad de electrolineras.

Las 4 instancias se crean con la idea de simular recorridos típicos en la zona para cada caso, en los cuales se visiten cruces de alto y bajo tráfico al mismo tiempo. Con este enfoque se vio que recreando un escenario realista en cuanto a tráfico se refiere, en las instancias para el caso Rancagua–Machalí existe una preferencia por utilizar las electrolineras que conectan ambas localidades (Figura 19) en lugar de aquellas ubicadas exclusivamente en Rancagua o Machalí de manera individual, solo habiendo una exclusivamente más adentrada en territorio Rancagüino.

En resumen, la implementación del sistema propuesto mejora la eficacia del ruteo de vehículos eléctricos al incorporar una restricción vinculada a la autonomía del mismo, lo que resulta en una inclinación por tomar aquellas rutas que tienen menor costo energético.

Es importante tener en cuenta las limitaciones ligadas en este estudio, tal como se detallan en el apartado 2.3. Alcances y Limitaciones. Estas interfieren en los resultados obtenidos, lo cual ofrece en este mismo una perspectiva más amplia de estudio a trabajar con tal de alcanzar mejores resultados en escenarios más realistas, en donde se pueda tener en consideración que el estado de carga de la batería cambia de forma no lineal en pendientes o en tiempos que el vehículo está detenido, que el tráfico vehicular varía a lo largo del día (estas dos variables interfieren en que rutas tomar) o que también las ubicaciones escogidas como óptimas en este trabajo, en cuanto a recurso energético se refiere son inviables debido a los altos costos que tomaría llevarlas a cabo, lo cual llevaría a iterar nuevamente otro conjunto de electrolineras de prueba en zonas en donde si es viable instalarlas.

7. Conclusión

En este trabajo se ha implementado una técnica de localización de electrolineras basada en un problema de ruteo de vehículos eléctricos. Para llevar a cabo este proceso, se realizaron modificaciones en el código interno de VRPy, tanto en la sección relacionada con la resolución mediante el algoritmo de Clarke y Wright como en el enfoque de generación de columnas, con el objetivo de integrar la variable asociada al estado de carga de la batería del vehículo. También se incorporó la visita intermedia hacia una electrolinera como condicional para posibilitar de un punto de recarga del vehículo.

Se llevaron a cabo pruebas de localización en la ruta que conecta Rancagua y Machalí, así como en la comuna de Providencia. Estas ubicaciones fueron seleccionadas de manera estratégica para obtener un conjunto de electrolineras tanto en áreas de alto tráfico como en aquellas de bajo tráfico vehicular, tal como se ve en las figuras 15 y 23.

En los resultados, se consideraron como ubicaciones óptimas de electrolineras aquellas que minimizarán los costos asociados a distancia, tiempo y carga para distintos recorridos en un mismo mapa. En promedio, para el caso Rancagua–Machali se vio una disminución de uso de batería del 3,72% en aquellas ubicaciones seleccionadas como óptimas, ahorrándose en promedio también 14,91 minutos de tiempo al hacer los 4 recorridos. En la comuna de Providencia las ubicaciones óptimas de electrolineras permiten realizar los recorridos con un 5,17% de ahorro en carga en promedio, ahorrando 2,89 minutos de recorrido.

De acuerdo a la pregunta formulada en la introducción, en este trabajo al introducir electrolineras como puntos de recarga intermedios condicionales, se desarrolla un sistema que mejora la eficiencia en el ruteo de vehículos eléctricos. Al optimizar la elección de rutas de los vehículos para minimizar el costo energético, se identifican las ubicaciones óptimas de electrolineras que permiten tener estos ahorros en cuanto a energía, distancia y tiempo se refiere.

Aun así, existen aspectos de mejora para la estrategia de localización explicada en este documento, estas están en el apartado 7.1. Trabajo futuro.

7.1. Trabajo futuro

- Agregar la posibilidad de resolver el problema con más vehículos y más electrolineras de por medio.
- Tener en consideración el acceso al recurso energético en las posibles ubicaciones a instalar electrolineras.
- Simular escenarios más realistas en donde los desniveles y zonas de detención en las rutas afecten en la autonomía del vehículo.
- Considerar variables económicas ligadas a costes operativos de los vehículos y costes de instalación de electrolineras.
- Considerar cómo la presencia de electrolineras en ciertas zonas puede influenciar el uso de vehículos eléctricos.

8. Referencias

- Ahmad, F. Khalid, M y Panigrahi, B. (octubre de 2021). An enhanced approach to optimally place the solar powered electric vehicle charging station in distribution network. *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103090. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103090>
- Andrenacci, N., Ragona, R., & Valenti, G. (2016) A demand side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations on metropolitan areas. , 182, 39–46. doi: 10.1016/j.aenergy.2016.07.137
- Brooker, R. P., & Qin, N. (2015). Identification of potential locations of electric vehicle supply equipment. *Journal of Power Sources*, 299, 76–84. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.08.097
- Cañar, F. (2022). Análisis para la adecuada ubicación de electrolineras de carga rápida en la ciudad de Cuenca. Trabajo de titulación. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca. Ecuador. 2022
- Cspy Documentation — CsPy 1.0.0 documentation. (s. f.). Recuperado el 25 de octubre de 2023 <https://cspy.readthedocs.io/en/latest>.
- De Giovanni, L y Di Summa, M. (s.f.) *Methods and Models for Combinatorial Optimization: Exact methods for the Traveling Salesman Problem*.
- ElectroMOV. (16 de enero de 2023). Vacaciones a bordo de auto eléctrico: ¿Dónde puedo cargar mi vehículo? – Negocios e industrias. ElectroMov. Recuperado el 15 de noviembre de 2023. <https://www.electromov.cl/2023/01/12/vacaciones-a-bordo-de-auto-electrico-donde-puedo-cargar-mi-vehiculo/>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Fredriksson, H. Dahl, M y Holmgren, J. (2019). Optimal placement of Charging Stations for Electric Vehicles in large-scale Transportation Networks. *Procedia Computer Science*, vol. 160, pp. 77–84, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.446>
- GATICA, G. AHUMADA, G. ESCOBAR, J y LINFATI, R. (marzo del 2021). Efficient Heuristic Algorithms for Location of Charging Stations in Electric Vehicle Routing Problems. *Studies in Informatics and Control*, vol. 27, no. 1. doi: <https://doi.org/10.24846/v27i1y201808>
- Islam, MD. Shareef, H y Mohamed, A. (octubre de 2018). Optimal location and sizing of fast charging stations for electric vehicles by incorporating traffic and power networks. *IET*

- Intelligent Transport Systems, vol. 12, no. 8, pp. 947–957. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5136>
- Jar, Ben, Watson, Neville y Miller, Allan. (2016). Rapid EV Chargers: Implementation of a Charger. 10. (s.f.). “Protocol Development / CHADEMO” <https://www.chademo.com/technology/protocol-development>
- Jordán, J. Palanca, J. E. del Val, Julian, V. y Botti, V. (noviembre de 2022). Localization of charging stations for electric vehicles using genetic algorithms. Neurocomputing. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.11.122>
- Karakatič, S. Optimizing nonlinear charging times of electric vehicle routing with genetic algorithm. (febrero de 2021). Expert Systems with Applications, vol. 164, p. 114039. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114039>
- Li, J. Liu, Z y Wang, X. (diciembre de 2022). Public charging station localization and route planning of electric vehicles considering the operational strategy: A bi-level optimizing approach. vol. 87, pp. 104153–104153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104153>
- Lysgaard, J. (1997). Clarke & Wright’s savings algorithm. Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business, 44: 1–7.
- Maza Ortega, J.M. y Gómez Expósito, A. (2019). Sistema de recarga de vehículos eléctricos: revisión tecnológica e impacto en el sistema eléctrico. Recuperado el 10 de octubre de 2023. Economía Industrial, 411, 35–44.
- Mera, L. (2020). Análisis técnico para la implementación de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en la provincia de Galápagos”, Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ministerio de Energía. (8 de noviembre de 2021). Consultas Publicas: *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Recuperado el 10 de octubre de 2023. <https://energia.gob.cl/consultas-publicas/estrategia-nacional-de-electromovilidad>
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (3 de febrero de 2023). Noticias: *RED celebra su bus eléctrico número 1000 y Renca ya cuenta con 2 de cada 3 buses de alto estándar*. Recuperado el 25 de septiembre de 2023. <https://www.mtt.gob.cl/archivos/33794#:~:text=febrero%20de%202023>.
- Municipalidad de Providencia. (2023). Estudio de capacidad vial y movilidad urbana en la comuna de Providencia, *Resumen del estudio*. Recuperado el 8 de noviembre de 2023

[.https://providencia.cl/provi/site/docs/20221117/20221117150734/presentacion_mesa_de_trabajo_sesion_n_5.pdf](https://providencia.cl/provi/site/docs/20221117/20221117150734/presentacion_mesa_de_trabajo_sesion_n_5.pdf)

National Household Travel Survey. (2022). Recuperado el 5 de enero de 2024. <https://nhts.ornl.gov/>

NuMPY V1.26 Manual. (s. f.). *What is NUMPy?* Recuperado el 28 de octubre de 2023. <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>

Pagany,R. Ramirez,L. y Dorner,W. (2019) A review of spatial localization methodologies for the electric vehicle charging infrastructure, International Journal of Sustainable Transportation, 13:6, 433–449, DOI: 10.1080/15568318.2018.1481243

Plataforma de Electromovilidad (s.f.). Infografías: *Cargadores de vehículos eléctricos* .Ministerio de Energía. energia.gob.cl. Recuperado el 10 de octubre de 2023. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias?page=2>.

Plataforma de Electromovilidad (s.f.). Infografías: *Modos de carga*. Ministerio de Energía. energia.gob.cl. Recuperado el 11 de octubre de 2023. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/infografias?page=2>

Plataforma de Electromovilidad. (s. f.). *Beneficios de la electromovilidad*. Ministerio de Energía. Recuperado el 10 de octubre de 2023. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion/beneficios-de-la-electromovilidad>

Plataforma de Electromovilidad. (s. f.). *Información de cargadores para vehículos eléctricos*. Ministerio de Energía. Recuperado el 10 de octubre de 2023 <https://energia.gob.cl/electromovilidad/sistemas-de-carga>.

Protocol Development | CHADEMO. (s. f.). <https://www.chademo.com/technology/protocol-development> 10. *“Protocol Development / CHADEMO”*. Recuperado el 19 de octubre de 2023. <https://www.chademo.com/technology/protocol-development>.

PuLP. (3 de noviembre de 2022). PyPI. Recuperado el 25 de octubre de 2023. <https://pypi.org/project/PuLP/>

Sánchez, D. Tabares, A. Faria, L. Rivera, J y Franco, J. (marzo del 2022).A Clustering Approach for the Optimal Siting of Recharging Stations in the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows. Energies, vol. 15, no. 7, p. 2372. doi: <https://doi.org/10.3390/en15072372>..

Simchi-levi, D. Chen, Xin y Bramel, J. (2014). The Logic of Logistics. 10.1007/978-1-4614-9149-1.

Superintendencia de electricidad y combustibles. (2023) Electromovilidad, *Infraestructura de recarga de vehículos Eléctricos*. Recuperado el 31 de octubre de 2023. <https://www.sec.cl/electromovilidad/#1619835330588-293024be-bd83>.

SURPLAN. (2020). INFORME ETAPA 2 ESTUDIO PLAN SECCIONAL DE REMODELACIÓN Y PLANO DE DETALLE DAMERO FUNDACIONAL RANCAGUA. DIAGNÓSTICO CAPITULO V PROCESO DE LA EAE DE LA ETAPA. pp. 24-25. Recuperado el 31 de octubre de 2023. <http://www.surplan.cl/participacion/PSRDF%20RANCAGUA/diagnostico%20capitulo%205.pdf>.

Taborelli, M. (29 de noviembre de 2021). Conoce las regiones con más cargadores por vehículos eléctricos en Chile – Mobility Portal: *Noticias sobre vehículos eléctricos*. Recuperado el 31 de octubre de 2023 .<https://mobilityportal.lat/conoce-las-regiones-con-mas-cargadores-por-vehiculos-electricos-en-chile>

Tobón-Ramírez, D. A., y Restrepo-Laverde, J. V. (2018). Desarrollo de estación de carga de vehículos eléctricos. Lámpsakos (revista Descontinuada), 1(19), 22-29. <https://doi.org/10.21501/21454086.2532>

Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. SIAM.

Trans O'Higgins. (5 de marzo de 2020). Rancagua-Machalí: *Autoridad de Transportes proyecta hasta 4.500 vehículos en horario de mayor congestión*. Trans O'Higgins. Recuperado el 31 de octubre de 2023. <https://www.transohiggins.com/rancagua-machali-autoridad-de-transportes-proyecta-hasta-4-500-vehiculos-en-horario-de-mayor-congestion>

Universidad De O'Higgins. (2023, 23 de mayo de 2023). Regiones al Debe: *El panorama de la electromovilidad en Chile y sus proyecciones* – Universidad de O'Higgins. Universidad de O'Higgins. Recuperado el 5 de noviembre de 2023. <https://www.uoh.cl/regiones-al-debe-el-panorama-de-la-electromovilidad-en-chile-y-sus-proyecciones/>

VRPY 0.1.0 Documentation. (2020). *Mathematical Background*. Recuperado el 29 de septiembre de 2023. https://vrpy.readthedocs.io/en/latest/mathematical_background.html#master-problem

Y.-W. Chen, C.-Y. Cheng, S.-F. Li, y C.-H. Yu. (2018). Location optimization for multiple types of charging stations for electric scooters,” Applied Soft Computing, vol. 67, pp. 519-528. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.038>.

Zhu, Z. Zhou, G y Luo, S. (Mayo de 2022). Location optimization of electric vehicle charging stations: Based on cost model and genetic algorithm. Energy, vol. 247, p. 123437. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123437>

9. Anexos

9.1. Algoritmo de Clarke y Wright

9.1.1. Diagrama de flujo

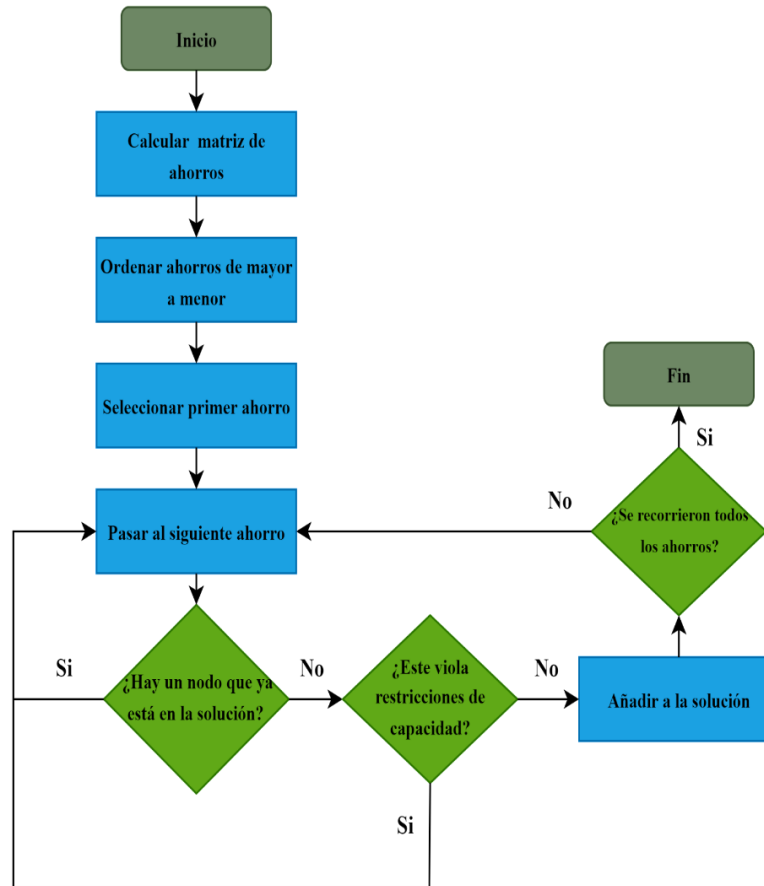


Figura 28: Diagrama de flujo algoritmo de ahorros de Clarke y Wright. Elaboración propia a partir de Lysgaard (1997).

9.1.2. Ejemplo de aplicación de algoritmo de Clarke y Wright

Se desea satisfacer la demanda de cuatro clientes, los costos en distancia entre todos los pares de nodos se ven en la Figura 29.

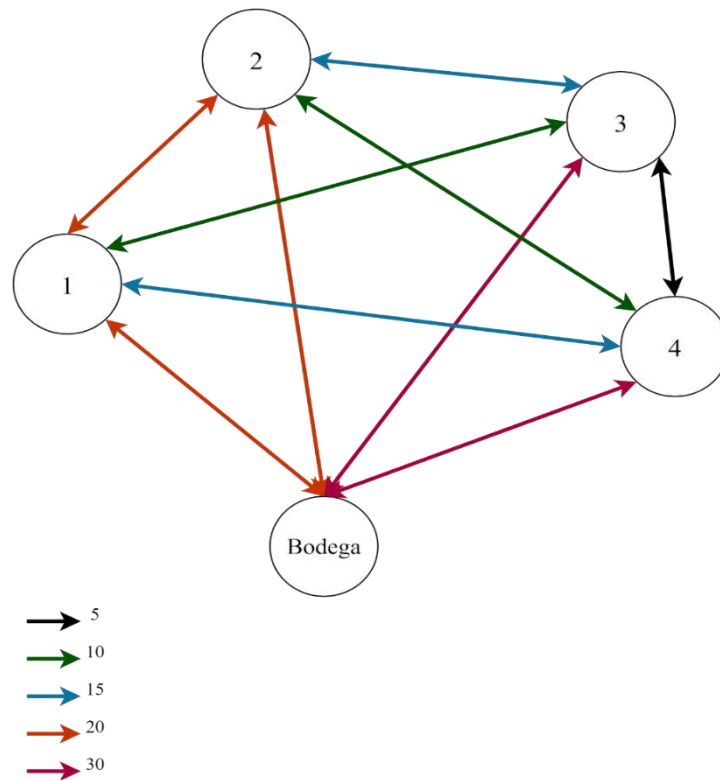


Figura 29: Grafo dirigido de ejemplo algoritmo Clarke and Wright.

La demanda de los clientes se presenta de la siguiente manera:

- Cliente 1: Demanda de 2 unidades.
- Cliente 2: Demanda de 3 unidades.
- Cliente 3: Demanda de 1 unidad.
- Cliente 4: Demanda de 4 unidades.

Con camiones de una capacidad de 7 unidades, se busca satisfacer la demanda de los 4 clientes minimizando los costos asociados a distancia total recorrida. Para lograrlo, se inicia el proceso calculando la matriz de ahorros, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Matriz de ahorros de algoritmo de Clarke and Wright

	1	2	3	4
1	X	20	40	35
2	X	X	35	40
3	X	X	X	55
4	X	X	X	X

Luego se ordenan de mayor a menor los pares de nodos que tienen mayor ahorro; estos son el (3,4), (2,4), (1,3), (2,3), (1,4) y (1,2). Con esto, la primera ruta inicia desde la bodega, pasa por el nodo 3, luego el 4, y, por último, se devuelve a la bodega. En el siguiente par de nodos con mayor ahorro, ya hay uno que existe en la actual ruta; por lo tanto, no hay que crear una nueva. En este caso, si se visita el nodo 2 en esta ruta, el camión sobrepasaría su capacidad; por lo tanto, se sigue con el siguiente par de nodos con mayor ahorro. Ahora, si es posible añadir el nodo 1 a la ruta, pues no sobrepasa la capacidad máxima del camión 1, teniendo la ruta {bodega, 3, 4, 1, bodega}. Al quedar solo 1 nodo disponible, este está obligado a ser visitado por otro camión debido a restricciones de capacidad, terminando así el algoritmo.

Este, al ser un algoritmo heurístico, no entrega la solución óptima exacta del problema, sin embargo, el método a menudo produce una solución relativamente buena.

9.2. Ejemplo de aplicación de restricción de carga y electrolinera

Se busca visitar los dos nodos indicados en Figura 30. La carga consumida al desplazarse de un nodo a otro es de 2, excepto para la ruta que va del nodo 2 al 1, donde se establece en 5. Con el atributo `bateria_inicial` fijado en 4, los resultados obtenidos al resolver el problema se presentan en las figuras 31 y 32.

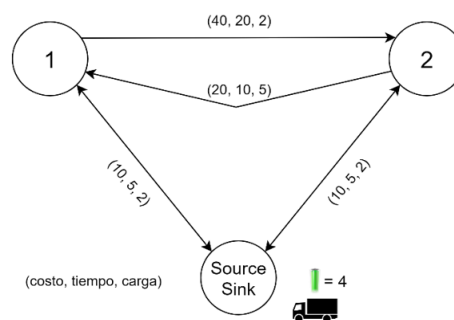


Figura 30: Grafo dirigido de ejemplo Figura 4 con carga necesaria para llegar de un nodo a otro.

```

INFO:vrpy.vrp:Clarke & Wright solution found with value 40 and 2 vehicles
INFO:vrpy.vrp:Greedy solution found with value 40 and 2 vehicles
INFO:vrpy.vrp:iteration 0, 40.0
INFO:vrpy.master_solve_pulp:total cost = 40.0

```

```
{1: ['Source', 2, 'Sink'], 2: ['Source', 1, 'Sink']}
{1: 0, 2: 0}
```

Figura 31: Resultado de problema Figura 30.

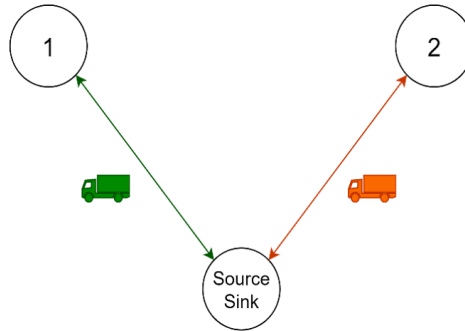


Figura 32: Rutas de los dos vehículos

Se observa la necesidad de emplear dos vehículos para abordar el problema. Aunque la ruta que se extiende desde el nodo 2 hasta el 1 resulta ser más económica en términos de costo, la carga utilizada para recorrerla supera la capacidad total disponible en los vehículos. Al resolver el problema sin considerar la restricción EDC, VRPy indica que con un solo vehículo partiendo desde la bodega, luego visitando el nodo 2 y finalmente el nodo 1, se obtiene una solución óptima mejor, establecida en 30. Este resultado confirma que la restricción EDC está siendo considerada por el problema de optimización, influyendo en la búsqueda de la solución más adecuada.

Añadiendo una electrolinera al problema, se establece el atributo recharge al nodo 1 del ejemplo y se obtiene una nueva solución, la cual se ve en la Figura 33.

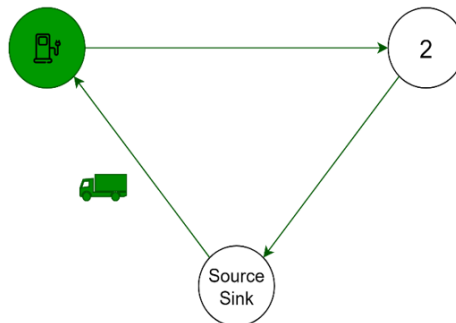


Figura 33: Ruta de vehículo con recarga.

Ahora un solo vehículo es capaz de hacer la ruta completa, recorriendo todos los nodos y llegando con una batería final de 0 a la bodega.

9.3. Electrolineras en Rancagua–Machalí y Providencia

Tabla 5: Datos de electrolineras entre Rancagua y Machalí.

Electrolinera	Potencia	Número de cargadores	Conectores
Enel X StripCenter Nogales	44 kW	1	T2SC-CCS T2
IRVE Espacio urbano Machalí	70 kW	1	CCS T2
Enel X Petrobras Rancagua La Compañía	60 kW	1	T2SC-CCS T2-CHAdMO
Electrolinera República de Chile	144 kW	1	CCS T2-T2-CHAdMO

Tabla 6: Datos de electrolineras en Providencia

Electrolinera	Potencia	Número de cargadores	Conectores
Tattersal	22 kW	1	T1
Save Express Santa Isabel	24 kW	1	T2SC
Tottus Factoria 1	22 kW	1	CCS T2-CHAdMO
Edificio Deja vu	15 kW	2	T2SC
Hotel Sheraton	44 kW	2	T2SC
Automóvil Club	14 kW	1	T1-T2
Parking Saba Machant Pereira	21 kW	3	T2SC
Parking Saba Pedro de Valdivia	21 kW	3	T2SC
Hotel Eurotel	44 kW	2	T2SC
Hotel Torremayor	44 kW	2	T2SC
Hotel Torre Mayor	44 kW	2	T2SC
Parking Saba Ricardo Lyon	21 kW	3	T2SC
Parking Saba Guardia Vieja	21 kW	3	T2SC
Costanera Center	28 kW	2	T1-T2
Parque Metropolitano	44 kW	4	T2SC

9.4. Autonomía y velocidad promedio para cada caso de estudio

La autonomía de cada vehículo en relación con la instancia respectiva se determina mediante la resolución de dicha instancia (sin considerar ninguna restricción). En este proceso, se registra la distancia total recorrida, y al formular la instancia de ruteo con una electrolinera de por medio, la autonomía estará dada por esa distancia total recorrida menos un 5% de la misma, con el fin de cobrar sentido a la integración de la estación a una instancia que no tendría solución si no estuviera (considerando la restricción asociada a la carga).

En la instancia 1 en el caso de estudio 6.1. Ruta Rancagua–Machalí se resuelve esta sin integrar la electrolinera y se registra la distancia total recorrida.

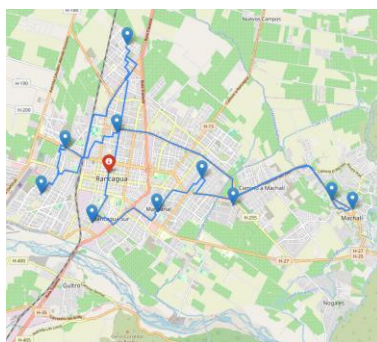


Figura 34: Solución instancia 1 en Rancagua–Machalí (Distancia: 43,8 km).

Añadiendo la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular a la instancia, la autonomía del vehículo será de 41,61 km (un 5% menos que al recorrer la ruta sin electrolinera). Con esto, se resuelve nuevamente la instancia considerando la visita a la electrolinera 1 en zona de alto tráfico y se registra la distancia total recorrida, el tiempo empleado y la carga utilizada, tal como se ve en la Figura 17.

Para las instancias de ambos casos el análisis es similar. En zonas de alto tráfico se utiliza una velocidad promedio de 20 km/h y para zonas de bajo tráfico vehicular esta sube a 25 km/h, esto con tal de determinar un tiempo estimado que le tomaría al vehículo terminar la ruta. El tiempo de recarga es fijo para cada caso, siendo de 20 min.

Instancia 2 en caso de estudio 6.1. Ruta Rancagua–Machalí.

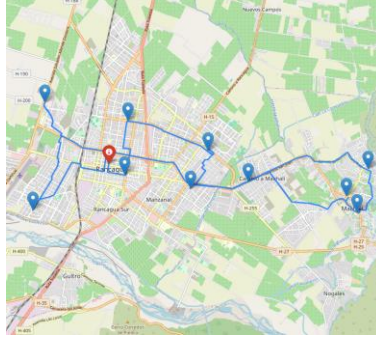


Figura 35: Solución instancia 2 en Rancagua-Machalí (Distancia: 40,7 km).

Se añade la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular y se resuelve la instancia, la autonomía del vehículo es de 38,6 km.

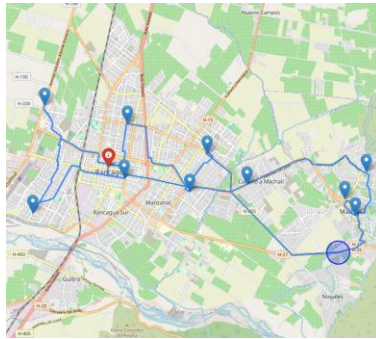


Figura 36: Solución instancia 2 en Rancagua-Machalí con electrolinera 1 en zona de alto tráfico (Distancia: 43,2 km, Tiempo: 144,8 min, Carga: 114,9%).

Instancia 3 en caso de estudio 6.1. Ruta Rancagua-Machalí.

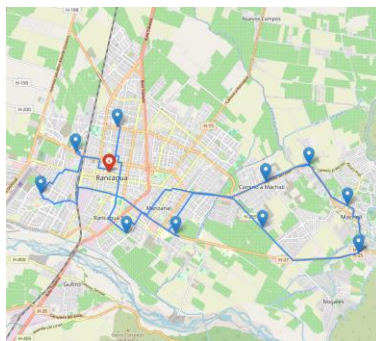


Figura 37: Solución instancia 3 en Rancagua-Machalí (Distancia: 39 km).

Se añade la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular y se resuelve el problema, la autonomía del vehículo es de 37,05 km.

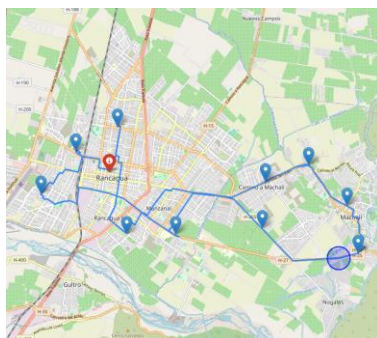


Figura 38: Solución instancia 3 en Rancagua–Machalí con electrolinera 1 en zona de alto tráfico
(Distancia: 39,1 km, Tiempo: 132,2 min, Carga: 105,4%).

Instancia 4 en caso de estudio 6.1. Ruta Rancagua–Machalí.

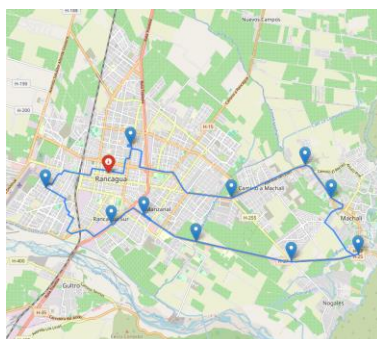


Figura 39: Solución instancia 4 en Rancagua–Machalí (Distancia: 31 km).

Se añade la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular y se resuelve el problema, la autonomía del vehículo es de 29,45 km.

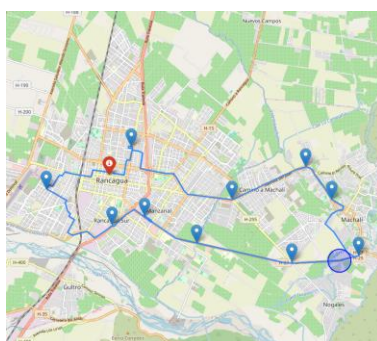


Figura 40: Solución instancia 4 en Rancagua–Machalí con electrolinera 1 en zona de alto tráfico
(Distancia: 31,1 km, Tiempo: 89,4 min, Carga: 107,2%).

En la instancia 1 en el caso de estudio 6.2. Providencia se resuelve sin integrar la electrolinera y se registra la distancia total recorrida.

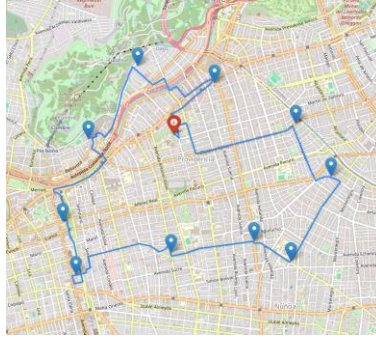


Figura 41: Solución instancia 1 en Providencia (Distancia: 18,3 km).

La autonomía de la instancia 1 es de 17,3 km. La solución utilizando la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular se ve en la Figura 25.

En la instancia 2 la distancia total recorrida es de 18,7 km.

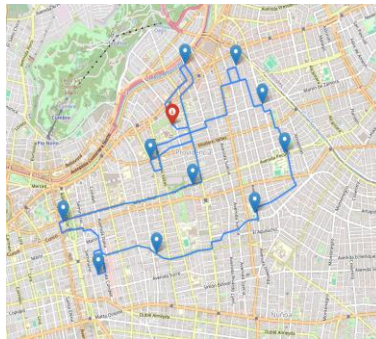


Figura 42: Solución instancia 2 en Providencia (Distancia: 18,7 km).

Añadiendo la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular, se resuelve el problema con una autonomía de 17,76 km.

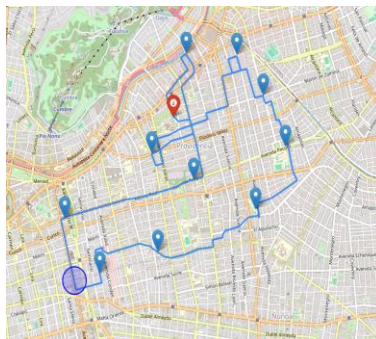


Figura 43: Solución instancia 2 en Providencia con electrolinera 1 en zona de alto tráfico (Distancia: 18,8 km, Tiempo: 71,4 min, Carga: 110,1%).

En la instancia 3 la distancia total recorrida es de 19,3 km.

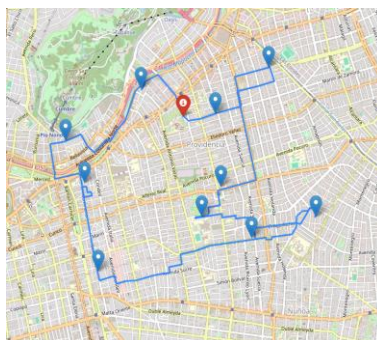


Figura 44: Solución instancia 3 Providencia (Distancia: 19,3 km).

Añadiendo la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular, se resuelve el problema con una autonomía de 18,3 km.

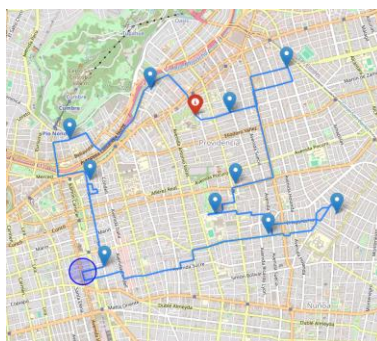


Figura 45: Solución instancia 3 en Providencia con electrolinera 1 en zona de alto tráfico (Distancia: 19,9 km, Tiempo: 74,9 min, Carga: 110,86%).

En la instancia 4 la distancia total recorrida es de 20,7 km.

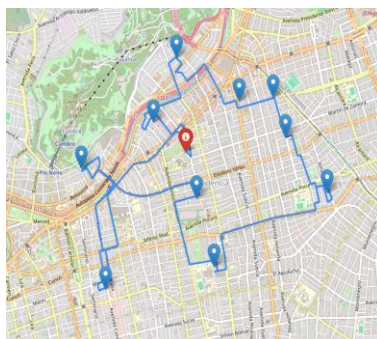


Figura 46: Solución instancia 4 en Providencia (Distancia: 20,7 km).

Añadiendo la electrolinera 1 en zona de alto tráfico vehicular, se resuelve el problema con una autonomía de 19,6 km.

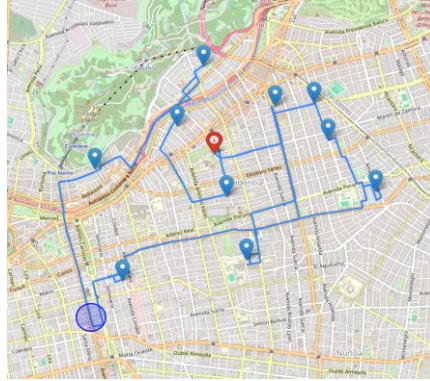


Figura 47: Solución instancia 4 en Providencia con electrolinera 1 en zona de alto tráfico

(Distancia: 25,4 km, Tiempo: 91,1 min, Carga: 133,1%).

9.5. Resultados instancias de ruteo

9.5.1. Resultados en Rancagua–Machalí para electrolineras en zonas de alto tráfico vehicular

Tabla 7: Resultados de ruteo para electrolineras situadas en zonas de alto tráfico en ruta Rancagua–Machalí.

Electrolinera	Instancia 1			Instancia 2			Instancia 3			Instancia 4		
	D	T	C	D	T	C	D	T	C	D	T	C
1	47,7	158,3	113,7	43,2	144,8	114,9	39,1	132,2	105,4	31,1	89,4	107,2
2	46,1	153,5	109,8	43,2	144,8	113,6	39,1	132,2	105,4	31,9	91,6	109,8
3	46,8	155,5	109,8	43,3	145,1	111,1	39,5	133,8	106,8	31,9	91,7	110,1
4	45,8	152,5	108,5	41,4	139,4	108,9	38,6	131	104,3	31,1	89,7	107,2
5	42,1	141,4	102,6	41,8	140,6	109,9	39,1	132,2	105,4	32,9	111,2	108,9
6	46,5	154,5	103,1	39,9	134,9	105,1	39,1	132,2	105,4	31,7	91,1	109,1
7	46,7	155,4	113,6	41,1	138,1	107,7	43,8	146,6	118,3	37,1	103,9	127,5
8	46,1	153,3	107,9	41,4	139,3	108,9	45,1	150,4	121,7	31,5	90,8	108,7
9	51,6	170	102,1	45,1	150,2	113,7	44,8	149,5	121,2	37,9	105,8	130,5
10	47,3	157,1	115,4	44,3	148	107,2	36,2	123,7	97,8	31,3	90,3	108,1
11	48,3	159,9	103,1	42,2	141,7	108,9	45,7	152,3	123,4	32,8	93,9	113,2
12	43,1	144,1	104,8	41,3	138,9	106,9	38,8	131,5	104,8	34,1	96,6	117,1
13	44,3	148,2	108,1	42,4	142,4	111,6	39,1	132,2	105,5	31,1	89,6	107,1

Para obtener el ahorro que se tiene al utilizar las electrolineras óptimas en comparación con sus pares, primero se obtiene el promedio utilizado de carga en las 4 rutas con las 13 electrolineras. Una vez se tiene el promedio, a este se le resta la carga total utilizada y el tiempo para ver el ahorro de cada electrolinera, tal como se ve en la Tabla 8.

Tabla 8: Tabla de análisis de caso Rancagua–Machali electrolinerías en zonas de alto tráfico.

Electrolinera	Σ cargas	Σ tiempo	Promedio cargas– Σ carga	Promedio tiempo– Σ tiempo	Promedio cargas	Promedio tiempo
1	441,3	524,72	-1,2	3,5	438,39	528,29
2	438,8	522,1	1,3	6,2		
3	437,9	526,18	2,2	2,1		
4	429,1	512,62	11,1	15,6		
5	426,9	525,476	13,2	2,8		
6	422,7	512,71	17,4	15,5		
7	467,4	544,04	-27,2	-15,7		
8	447,4	533,83	-7,2	-5,5		
9	467,3	575,68	-27,2	-47,3		
10	428,4	519,11	11,7	9,1		
11	448,8	547,84	-8,6	-19,5		
12	433,6	511,13	6,5	17,2		
13	432,2	512,43	7,9	15,8		

Estos datos reflejan el ahorro en carga y tiempo de cada electrolinera en comparación al promedio. Para obtener el promedio de las tres electrolinerías en comparación con las demás, simplemente se realiza la fórmula de promedio simple, tal como se ve en las ecuaciones 27 y 28.

$$\text{Ahorro promedio en carga} = \frac{11,1 + 17,4 + 7,9}{3} = 12,13 \% \quad (27)$$

$$\text{Ahorro promedio en tiempo} = \frac{15,6 + 15,5 + 15,8}{3} = 15,63 \text{ min} \quad (28)$$

Para obtener el ahorro promedio en cada ruta, se divide este número por el total de rutas utilizadas (ecuaciones 29 y 30).

$$\text{Ahorro promedio de carga por ruta} = \frac{12,13\%}{4} = 3,03 \% \quad (29)$$

$$\text{Ahorro promedio de tiempo por ruta} = \frac{15,63 \text{ min}}{4} = 3,9 \text{ min} \quad (30)$$

Para obtener los ahorros promedio en carga y tiempo en los otros casos se utiliza un análisis similar.

9.5.2. Resultados en Rancagua–Machalí para electrolinerías en zonas de bajo tráfico vehicular

Tabla 9: Resultados de ruteo para electrolinerías situadas en zonas de bajo tráfico en ruta Rancagua–Machalí.

Electrolinera	Instancia 1			Instancia 2			Instancia 3			Instancia 4		
	D	T	C	D	T	C	D	T	C	D	T	C
1	45,1	123,2	108,4	41,2	113,9	108,3	43,6	119,7	117,7	35,1	99,3	120,9
2	46,8	127,3	112,5	42,9	118,1	112,8	39,3	109,5	106,3	32,2	92,4	111
3	43,5	119,6	104,8	41,6	114,9	109,4	37,5	105	101,3	31,9	91,6	109,9
4	44,5	121,8	107	42,3	116,6	111,2	36,8	103,4	99,4	31,6	90,9	108,9
5	46,9	127,8	112,9	44,7	122,2	117,4	37,7	105,7	102	32,9	94	113,3
6	49,3	133,4	118,5	45,8	125	120,4	37,2	104,5	100,6	32,4	92,8	111,6
7	51,9	139,6	124,8	42,6	117,3	112	37,5	105,2	101,4	33,3	95	114,8
8	42,1	116,1	101,2	42,8	117,7	112,5	39,1	108,8	105,4	31,1	89,6	107,1
9	42,2	116,3	101,5	40,9	113,2	107,5	42,4	116,7	114,4	31,2	89,9	107,4
10	45,2	123,4	108,5	45,7	124,9	120,3	40,7	112,8	110	40,2	111,6	138,6
11	45,2	123,6	108,7	42,1	116	110,6	39,2	109	105,7	31,4	90,4	108,2
12	42,8	117,8	102,9	40,9	113,2	107,5	43,1	118,3	116,2	33,3	94,9	114,6
13	45,4	124,1	109,2	40,8	112,9	107,2	41,2	113,8	111,1	33,6	95,8	115,9

$$\text{Ahorro promedio en carga} = \frac{17,03 + 15,93 + 16,23}{3} = 16,4 \% \quad (31)$$

$$\text{Ahorro promedio en tiempo} = \frac{15,09 + 13,42 + 13,99}{3} = 14,19 \text{ min} \quad (32)$$

$$\text{Ahorro promedio de carga por ruta} = \frac{16,4\%}{4} = 4,1 \% \quad (33)$$

$$\text{Ahorro promedio de tiempo por ruta} = \frac{14,19 \text{ min}}{4} = 3,54 \text{ min} \quad (34)$$

9.5.3. Resultados en Providencia para electrolinerías en zonas de alto tráfico vehicular

Tabla 10: Resultados de ruteo para electrolinerías situadas en zonas de alto tráfico en Providencia.

Electrolinera	Instancia 1			Instancia 2			Instancia 3			Instancia 4		
	D	T	C	D	T	C	D	T	C	D	T	C
1	22,9	83,9	134,9	18,8	71,4	110,1	19,9	74,9	110,8	25,4	91,1	133,1
2	22,9	83,9	134,9	20,6	77,1	121,2	23,7	86,4	132,1	22,7	83,2	119,3
3	22,8	83,9	134,9	19,9	74,7	116,6	20,6	76,9	114,6	22,7	83,2	119,3
4	24,1	87,4	141,8	20,5	76,5	120,1	21,9	80,8	121,7	25,5	91,5	133,8
5	23,1	84,5	136,0	20,7	77,3	121,7	19,3	73,1	107,3	21,1	78,1	107,3
6	25,6	91,8	150,3	17,9	68,8	105,2	19,3	73	107,2	20,7	77,3	106,1
7	23,1	84,1	135,3	25,3	91,1	148,6	20,3	76,1	113,1	20,8	77,4	106,2
8	23,7	86,2	139,4	21,6	80,1	127,1	19,5	73,1	107,9	20,8	77,6	106,4
9	23,6	85,9	138,8	20,5	76,5	120,3	19,3	73,1	107,2	21,4	79,3	109,4
10	18,9	71,8	109,4	20,7	77,2	120,5	23,1	84,2	128,1	24,6	88,9	125,7
11	24,9	89,8	146,5	19,8	74,5	115,9	23,4	85,5	130,4	21,4	79,3	109,4

12	24,2	87,5	141,9	25,5	91,5	149,5	28,2	99,7	156,6	23,2	84,6	118,7
13	24,3	87,8	142,5	19,5	73,7	115,2	27,5	97,5	152,7	23,2	84,6	119,7
14	23,7	86,2	139,4	19,2	72,8	112,9	22,1	81,1	120,4	23,1	84,1	120,9
15	23,7	86,2	139,4	26,1	93,1	152,4	21,5	79,5	117,6	21,1	78,4	107,2
16	22,9	83,9	134,9	18,2	69,9	107,2	20,8	77,5	115,5	23,8	86,6	125,3
17	22,8	83,9	134,9	25,9	92,9	152,1	19,3	73	107,2	22,7	83,2	119,3
18	20,8	77,5	120,4	18,7	71,2	109,7	21,1	78,0	114,8	23,1	84,2	121,1

$$\text{Ahorro promedio en carga} = \frac{23,8 + 27,3 + 20,32 + 30,9}{4} = 25,58 \% \quad (35)$$

$$\text{Ahorro promedio en tiempo} = \frac{15,6 + 17,5 + 13,7 + 17,6}{4} = 16,2 \text{ min} \quad (36)$$

$$\text{Ahorro promedio de carga por ruta} = \frac{25,39\%}{4} = 6,39 \% \quad (37)$$

$$\text{Ahorro promedio de tiempo por ruta} = \frac{16,2 \text{ min}}{4} = 4,05 \text{ min} \quad (38)$$

9.5.4. Resultados en Providencia para electrolineras en zonas de bajo tráfico vehicular

Tabla 11: Resultados de ruteo para electrolineras situadas en zonas de bajo tráfico en Providencia.

Electrolinera	Instancia 1			Instancia 2			Instancia 3			Instancia 4		
	D	T	C	D	T	C	D	T	C	D	T	C
1	23,4	71,3	137,8	19,4	61,7	113,9	24,2	73,1	134,3	23,1	70,3	120,9
2	23,8	72,3	140,1	25,9	77,3	152,1	20,6	64,6	114,6	23,5	71,6	123,6
3	24,3	73,4	143	18,9	60,6	111,2	24,1	72,9	133,7	18,9	60,4	99,2
4	23,2	70,7	136,3	19,4	61,6	113,7	24,8	74,6	137,7	21,6	66,9	113,5
5	25,2	75,7	148,5	19,3	61,4	113,2	21,1	65,6	117	25,5	76,4	134,2
6	23,1	70,2	135,1	23,5	71,4	137,8	19,3	61,6	107,6	21,1	65,9	111,3
7	25,1	75,4	147,7	20,1	63,3	117,9	19,3	61,4	107,2	20,8	65,1	109,5
8	25,8	76,9	151,5	20,3	63,8	119,1	21,1	65,7	117,1	24,7	74,3	129,6
9	23,9	72,4	140,3	19,6	62,1	114,9	19,6	62,1	108,8	21,7	67,3	114,3
10	24,9	74,8	146,2	20,5	64,3	120,3	22,4	68,9	124,5	23,6	71,6	123,8
11	24,8	74,5	145,6	18,8	60,3	110,5	19,3	61,4	107,2	22,6	69,2	118,6
12	23,2	70,7	136,2	19,7	62,3	115,4	20,8	65,1	115,7	20,9	65,3	109,9
13	23,2	70,7	136,3	19,7	62,5	115,9	21,1	65,7	117,1	21,6	67	113,7
14	24	72,6	141	19,9	62,8	116,8	22,7	69,7	126,4	22,6	69,3	118,7
15	23,8	72,2	139,9	19,1	60,8	111,7	23,8	72,2	132,2	21,1	65,7	110,8
16	23,7	72	139,6	18,7	60	109,8	21,9	67,7	121,8	21,5	66,7	113
17	24,2	73,2	142,3	19,8	62,5	116	23,3	70,9	129,3	22,6	69,3	118,7
18	23,7	72	139,4	19,8	62,7	116,5	21,3	66,2	118,2	22,8	69,8	119,8

$$\text{Ahorro promedio en carga} = \frac{9,9 + 14,75 + 18,75 + 19,8}{4} = 15,8 \% \quad (39)$$

$$\text{Ahorro promedio en tiempo} = \frac{4,58 + 6,83 + 7,98 + 8,4}{4} = 6,94 \text{ min} \quad (40)$$

$$\text{Ahorro promedio de carga por ruta} = \frac{15,8\%}{4} = 3,95 \% \quad (41)$$

$$\text{Ahorro promedio de tiempo por ruta} = \frac{6,94 \text{ min}}{4} = 1,73 \text{ min} \quad (42)$$