

Despliegue óptimo georreferenciado de estaciones de carga vehicular pública considerando capacidad de flujo y distancias máximas habilitantes

Georeferenced optimal deployment for public vehicle charge station considering restrictions of capacity flow and maximal enablers distance

Miguel Campaña^{1*}, Esteban Inga¹

¹ Grupo de Investigación GIREI, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: mcampana@ups.edu.ec

RESUMEN— Los desafíos modernos están orientados a la reducción significativa de gases de efecto invernadero, los cuales, deterioran la calidad del aire. El parque automotor, suministros de energía (gas, vapor, aire acondicionado, agua para uso industrial y energía eléctrica) son fuentes de CO_2 que se liberan en la atmósfera. Es por ello que, el presente artículo propone un modelo heurístico orientado a la reducción significativa de la dependencia de vehículos de combustión interna. El éxito o desacierto de la penetración masiva de vehículos eléctricos enchufables (VEE) no solo dependerá de la capacidad instalada en los sistemas eléctricos de distribución, sino que, además, de la autonomía y confort que los VEE logren brindar al usuario final. Por lo tanto, con el algoritmo Mínimo Emplazamiento de Estaciones de Carga Geolocalizadas (MEECG) se propone un modelo capaz de emplazar infraestructuras de estaciones de carga pública (IECP) considerando flujo vehicular y distancias máximas habilitantes. De tal manera que, se seleccione el mínimo número de estaciones de carga pública (ECP) garantizando la posibilidad de que un VEE pueda conectarse a una ECP reduciendo al máximo la ansiedad de alcance de parte del operador del VEE.

Palabras clave—Flujo de tráfico equilibrado, Modelo heurístico, Múltiples instalaciones de carga, Redes públicas de estaciones de carga, Teoría de grafos, Ubicación óptima, Vehículos eléctricos enchufables.

ABSTRACT— Modern challenges are aimed at the significant reduction of greenhouse gases, which deteriorate air quality. The automotive fleet, energy supplies (gas, steam, air conditioning, water for industrial use and electricity) are sources of CO_2 that are released into the atmosphere. That is why; this article proposes a heuristic model aimed at significantly reducing dependence on internal combustion vehicles. The success or failure of the massive penetration of plug-in electric vehicles (PEV) will not only depend on the installed capacity in the electrical distribution systems, but also on the autonomy and comfort that the PEV can provide to the end user. Therefore, with the Geolocalised Minimum Station Staging Algorithm (GMSSA), a model capable of deploying infrastructure of public charging stations (IPCE) considering vehicular flow and maximum enabling distances is proposed. In such a way that, the minimum number of public charging stations (PCE) is selected, guaranteeing the possibility that a PEV can connect to a PCE, reducing to the maximum the anxiety of reach of the operator of the PEV.

Keywords—Balanced traffic flow, Heuristic model, Multiple loading facilities, Public networks of cargo stations, Graphical schema theory, Optimal location, Plug-in electric vehicles.

1. Introducción

El agotamiento de los recursos fósiles y la degradación del medio ambiente por emisiones de CO_2 son causales de la reducción en la calidad de aire. La inclusión de VEEs ayudará sin lugar a duda a reducir la liberación de gases de efecto invernadero e inclusive la contaminación auditiva [1]. Por lo tanto, el presente artículo pretende abordar el problema relacionado con la movilidad. Para la difusión e introducción de VEEs es necesario implementar IECP, puesto que, se debe garantizar la operatividad del VEE en el tiempo. En [2]–[4] se puede evidenciar la importancia de la ubicación óptima de estaciones de carga (EC) como uno de los ejes

fundamentales para el desarrollo en la industria del VEE, garantizando así, la adecuada operatividad y ciclo óptimo de vida de las IECP [5]. En consecuencia, se pretende establecer directrices fundamentales para el desarrollo sostenible de IECP para VEEs reduciendo al máximo, no solo costos de infraestructura, sino que además, el costo social [6]. La sostenibilidad se refiere al desarrollo a largo plazo que incluye tres pilares: crecimiento económico, desarrollo social y protección ambiental. En la dimensión social, se consideran factores como la armonización de EC para VEEs mediante la planificación del desarrollo de la red vial urbana y de la red eléctrica,

Citación: M. Campaña y E. Inga, “Despliegue óptimo georreferenciado de estaciones de carga vehicular pública considerando capacidad de flujo y distancias máximas habilitantes,” *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. (68-78), 2019.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 30 de enero de 2019. **Recibido con correcciones:** 10 de junio de 2019. **Aceptado:** 26 de julio de 2019.

DOI: 10.33412/idt.v15.2.224810.33412/idt.v15.2.2248

Copyright: 2019 M. Campaña. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

la convergencia de tráfico, la capacidad de servicio y el impacto en la vida de las personas [7], [8].

Varios métodos a nivel mundial se han propuesto para ubicar y dimensionar EC. Por ejemplo, se ha incorporado algoritmos como enjambre de abejas con sus siglas en inglés (PSO), algoritmos genéticos, diagramas de voronoi, teoría de juegos. Lo cierto es que, en aquellos esfuerzos no se consideran factores de mucha importancia como lo son: flujo de tráfico, redes viales, estructuras, constantes de capacidad y consideraciones geográficas [9]. Además, estos métodos consideran zonas óptimas sin considerar espacios públicos existentes o candidatos para iniciar procesos de planeación coordinados. Es por ello que partimos, para el proceso de optimización, de sitios candidatos los cuales pueden ser, estaciones de servicio convencionales (gasolina, diésel), paradas de autobuses, supermercados, estacionamientos, parques, etc. Consecuentemente, el modelo propuesto no parte de escenarios donde se considera arbitrariamente sitios candidatos, como sucedería con voronoi al segmentar el área de análisis, sino que parte de un conocimiento íntegro del área de estudio. Es decir, el modelo propuesto conoce el área de estudio partiendo de su realidad cartográfica. Dicha información se la obtiene desde la aplicación OpenStreetMap desde su versión gratuita.

Por lo tanto, el presente artículo es capaz de dar solución al problema de emplazamiento de ECP, considerando restricciones de flujo vehicular y distancias máximas habilitantes. Se empleará los *softwares* Matlab y LpSolve para obtener la mejor topología y el menor número de ECP a emplazarse en el área de estudio. La solución estará dada en dos momentos: el *software* Matlab habilitará a todos aquellos nodos que por la restricción de distancia máxima permitida alcanzaron a formar parte de un posible conjunto solución. Con el *software* LpSolve se da solución al despliegue de ECPs considerando en sus inecuaciones la restricción de flujos que hará posible el identificar el vector solución resultante.

Finalmente, el artículo se organiza de la siguiente manera. La creación de IECP sostenibles y los impactos por inserción masiva de VEEs se discute en la sección II. En la sección III presentaremos de manera formal la metodología aplicada para resolver el problema, al igual que su formulación matemática. Los análisis de resultados serán expuestos en la sección IV. Finalmente, en la sección V concluimos el presente artículo advirtiendo los trabajos futuros que serán complementarios a la presente investigación.

2. Sostenibilidad de infraestructuras de centros de carga para VEEs

Las diferentes tecnologías aplicadas a los VEE sugieren diferentes comportamientos de carga en el sistema eléctrico. Existe dos tipos comunes de carga: i) carga convencional (lenta en corriente alterna) y ii) carga rápida en corriente directa. Los cargadores AC (carga lenta) de VEEs tienen un pequeño o incluso insignificante impacto en la red eléctrica, pero el escenario es totalmente diferente para una carga rápida en DC. En [10] se advierte la importancia de considerar los diferentes tipos de formas de carga (carga rápida, carga lenta e intercambio de batería) en procesos de planeación, de tal manera que, se pueda reducir al máximo la demanda de uso de EC rápida en la red eléctrica convencional durante el periodo de carga de los VEEs [11]. Sin embargo, los sitios de carga rápida desempeñan un papel crucial para la aceptación pública de VEEs. Por lo tanto, se puede pensar en la posibilidad de combinar el modo de carga de acuerdo a los requerimientos del usuario, es decir, modo de carga rápida y métodos de carga normal que responderán a los requerimientos del usuario en lugares de instalaciones rígidas de estaciones de carga como por ejemplo hogares y puestos de trabajo, ya que, este tipo de cargadores solo son factibles en tecnología de carga lenta. En consecuencia, se introduce el concepto de estaciones de carga de múltiples instalaciones (ECMI) para minimizar el costo total de potencia entregada para satisfacer la demanda total [12]. Por lo tanto, los esfuerzos de la comunidad científica están dirigidos a procesos de carga inteligente, de tal manera que, los VEEs sean cargas activas para la red inteligente en lugar de cargas meramente tradicionales [13].

En la figura 1 se advierte la necesidad de diseñar IECP que no solo permita la operatividad del VEE en zonas urbanas, sino que, brinde la posibilidad de cubrir rutas de mayor longitud minimizando cuadros de ansiedad por parte del operador del VEE por alcance. Adicionalmente, con la figura 1 se destaca la importancia del conocimiento del área en que el VEE se desplaza; dicho de otra manera, es fundamental establecer comunicaciones inalámbricas móviles (WiFi, GSM, etc.) con la finalidad de poder elegir la mejor opción para la carga del vehículo eléctrico. Al referirnos a la mejor opción, hacemos mención a la selección de aquella estación de carga que esté ubicada a la menor distancia desde cualquier punto en el que el vehículo eléctrico se encuentre y que además, la tasa de flujo

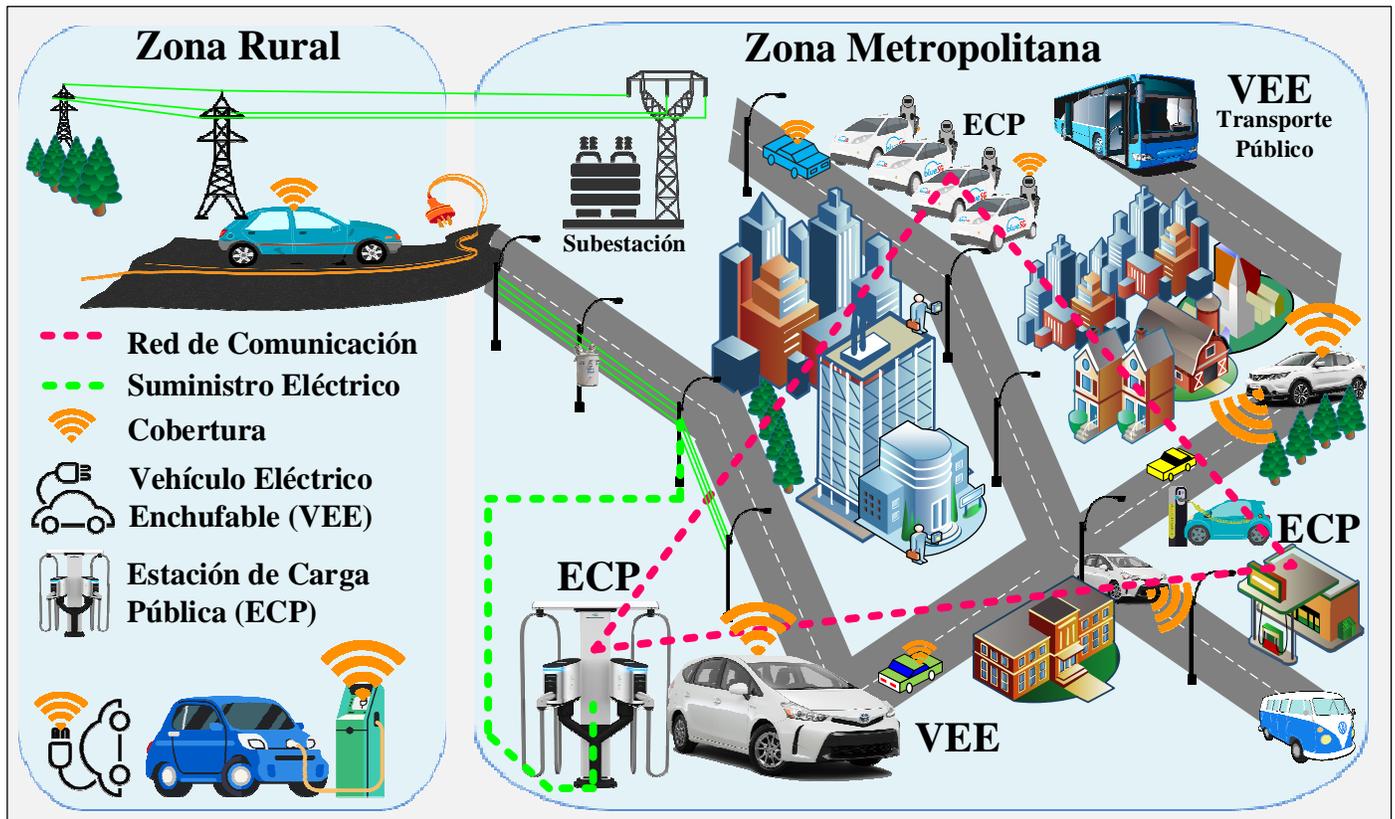


Figura 1. Infraestructura de estaciones de carga para vehículos eléctricos enchufables. Fuente Autor.

vehicular sea la máxima, considerando las capacidades de las vías, de tal manera que, no se genere aumentos en la tasa de coincidencia de recarga vehicular en las ECPs.

Otro detalle y, no menos importante, que se desvela mediante la figura 1 es la selección adecuada del número de ECP a ser emplazadas geográficamente. Al minimizar el número de ECP garantizando máxima cobertura al consumidor, nos permitirá reducir algunas variables de costos, tales como: social, tasas de coincidencia vehicular, impactos desfavorables en la red eléctrica de distribución por la cantidad de energía demandada en periodos cortos de tiempo, mismos que, comprometerán a la calidad del suministro eléctrico por parte de las empresas de distribución de energía eléctrica convencional.

Hasta este punto hemos podido apreciar la importancia de la ubicación [14]–[17] óptima de EC para VEEs. En [18]–[21] se manifiesta que la solución puede darse mediante múltiples capas (multígrafos) aplicando varias técnicas de optimización apoyándose en teoría de grafos y análisis probabilístico para el dimensionamiento de estaciones de carga pública. El presente artículo centrará su atención en la ubicación óptima de estaciones

de carga pública para dar origen a IECP. La ubicación de ECP no solo debe contemplar interconexión local, sino que, además, debe contemplar la interconexión entre regiones geográficas. Para lo cual, en [22] se exponen restricciones fundamentales, tales como: restricciones basadas en la demanda de viajes, flujo de tráfico, además, consideran necesario asumir algunas variables con la finalidad de relajar el problema, tales como: asumir que tanto los VEE como los usuarios son homogéneos, y el modelo propuesto es más aplicable para los días de trabajo [23].

Finalmente, en [24]–[25] se sugiere considerar, en el despliegue de ECP, la tecnología del vehículo (autonomía), tecnología de la estación de carga y el flujo vehicular en dependencia del área geográfica. Sin embargo, en el presente artículo prestaremos especial atención a las variables de flujo y distancias máximas habilitantes.

Cuando nos referimos a máximas distancias habilitantes se sugiere que para la selección del conjunto candidato de ECPs solo podrán ser tomadas en cuenta aquellas estaciones de carga vehicular que se encuentren dentro de la distancia máxima permitida habilitante.

Tabla 1. Características de los tipos de carga de baterías para VEE. Fuente [26], [27]

Tipos de Carga batería	Voltaje (V)	Corriente (Amp)	Potencia (kW)	Tiempo (min)	% Recarga	Estándar IEC	Propiedad	Tipo de corriente
Lenta	230	16	4 - 8	300 - 480	100	–	Público Privado	AC
Semi rápida	400	32	22	69	50 – 80	61851	Público	AC
Rápida	500	63	50	30	50 – 80		Público	AC
Ultra rápida	600	250 - 400	350	10	50 – 80		Público	DC
Cambio de batería	–	–	–	2	100		Privado	AC – DC

Dicho de otra manera, las estaciones de carga candidatos que cumplan con el criterio de una longitud máxima habilitante, que les relacione entre sí podrán ser candidatos del vector solución. La solución final surgirá del vector proporcionado como solución del *software* LpSolve, mismo que, en función del máximo flujo permitido a una u otra estación de carga candidato seleccionará únicamente las ECPs idóneas que garanticen la máxima cobertura de carga eléctrica con el menor número de sitios candidatos a emplazar múltiples tecnologías de carga para VEEs.

2.1 Impactos por integración masiva de VEE

En este apartado se realizará un análisis sobre el impacto generado en las redes eléctricas de distribución debido a la penetración masiva de VEEs. En [26], [27] se puede apreciar, a breves rasgos, los diferentes tipos de carga y mediante la tabla 1 se hace una breve caracterización de ellas.

Los operadores del sistema garantizan la continuidad del suministro eléctrico al igual que su correcta coordinación en la producción y transporte de energía eléctrica. Otra temática de mucha importancia tiene que ver con la sostenibilidad del sistema, puesto que, la integración masiva de VEEs causaría un incremento significativo de demanda energética en redes eléctricas de distribución introduciendo perturbaciones al sistema, por lo tanto, se requiere de previos estudios que nos permitan integrar VEEs de forma ordenada y planificada garantizando alta calidad y seguridad de abastecimiento. Si analizamos a detalle, el comportamiento de la carga en función del tiempo, es variable, lo que, provoca que la

curva de carga diaria de un día laborable sea distinta a fines de semana y feriados, obteniendo como resultados picos altos de consumo en determinados periodos de tiempo. Por lo tanto, un aspecto fundamental para la penetración masiva de VEEs es la curva de operación en sus picos máximos y mínimos.

Esto genera que las centrales de generación estén dispuestas a producir y operar de forma variable adecuándose a los requerimientos del sistema eléctrico de potencia (SEP). Un criterio de gestión conveniente es la introducción de cargas en horas valle, las cuales, se dan en horas de la noche; con esto se consigue aplanar la curva de la demanda proporcionando una ventaja importante para la introducción de VEEs. Se debe tener presente que la carga es uno de los factores más importantes sobre el cual se decide la introducción de nuevas unidades de generación. Por lo tanto, mantener el equilibrio entre lo generado y consumido garantiza el correcto funcionamiento del sistema y contribuye a reducir al máximo el índice de energía no suministrada.

En los últimos años la penetración de energía renovable ha generado aportes significativos de potencia al sistema eléctrico convencional. En trabajos previos [28]-[30] advertimos la importancia de adecuados sistemas de comunicación para que su operación con los sistemas convencionales sea óptima y segura, de tal manera que, se garantice la calidad y continuidad del servicio eléctrico desde la empresa distribuidora hacia los consumidores finales.

Por lo tanto, para la integración de VEEs es de vital importancia garantizar el fortalecimiento de los sistemas de transporte de la energía. Consecuentemente, los

impactos de los VEEs en las redes eléctricas de distribución dependen directamente de: i) factores de simultaneidad y ii) la tecnología de las baterías que están estrechamente relacionados con el tiempo y tipo de carga. Si nos fijamos a detalle en la tabla 1, podemos verificar que a medida que se reduce el tiempo de carga, que es un factor decisivo en procesos de aceptación pública, aumenta la corriente reduciendo el porcentaje del nivel de carga a excepción de la opción del cambio de batería. Por lo tanto, en función de la tecnología de las ECPs es más o menos complejo el impacto en redes convencionales de distribución eléctrica. Sin embargo, la aceptación pública demanda VEEs que garanticen la disponibilidad operativa permanente, de no ser así, la inclusión de esta nueva era de movilidad se verá comprometida y sujeta a rechazos por parte de los usuarios terminales. De ahí la importancia del presente artículo, es fundamental garantizar un óptimo emplazamiento de estaciones de carga que, al relacionarse entre sí, formarán IECP advirtiendo considerar como fundamental la integración de múltiples instalaciones para recarga de VEEs como se sugiere en la tabla 1.

3. Metodología y Formulación del Problema

La presente investigación es de categoría básica debido a su naturaleza experimental empleando procesos de simulación. Tiene un enfoque cuantitativo, puesto que, se busca determinar el mínimo número de estaciones de carga pública requerida para IECP que garanticen la operatividad de vehículos eléctricos enchufables, minimizando impactos económicos y social debido a las distancias máximas permitidas por alcance que ofrecerá cada vehículo eléctrico. Para ello, el modelo propone un proceso exploratorio, en el cual, se aplica procesos iterativos proporcionando información útil para decidir sobre un conjunto resultante óptimo. Finalmente, al ser exploratorio, el modelo sugiere analizar diferentes casos de estudio.

Por lo tanto, la metodología propuesta en el presente artículo advierte la necesidad de generar un algoritmo iterativo sujeto a condiciones iniciales mediante la observación de restricciones particulares en cada caso de estudio, dando origen así, a procesos heurísticos como medio para la búsqueda de la solución óptima al problema exploratorio que tiene como fin último lograr emplazar el mínimo número de estaciones de carga pública requerida para la adecuada operatividad por inserción masiva de vehículos eléctricos en zonas urbanas y rurales.

A continuación, presentamos la descripción formal del problema que se pretende resolver. La heurística propuesta empleará dos algoritmos que se encargarán de determinar la ubicación y el número óptimo de ECP y de determinar la mínima ruta que permita interconectarlos entre sí. Se advierte que dicha ruta de mínima podrá ser útil para el tendido eléctrico y tendido de fibra óptica logrando con ello determinar con exactitud los materiales y dispositivos requeridos para montar la IECP capaz de garantizar la operatividad inteligente masiva de vehículos eléctricos enchufables.

Tabla 2. Notaciones y Variables

Nomenclatura	Descripción
X_{ij}	Coordenadas de sitios candidatos
$A_{(n)}$	Área de estudio
n	Número de ECP emplazadas en áreas públicas
δ	Distancia máxima habilitante
α	Vector flujo
ψ	Malla habilitante
$flag$	Número binario de verificación
Δ_{int}	Vector temporal de intersección vial
Δ_p	Opciones de búsqueda en cada intersección
β	Vector de EC exploradas
Δ_{dv}	Distancias de verificación
ξ	Vector de EC seleccionados
d_f	Distancia total de vía habilitada
σ	Vector solución

Existe n estaciones de carga X distribuidas en lugares de acceso público dentro de un área A , A_n . Con el Algoritmo 1, Mínimo Emplazamiento de Estaciones de Carga Geolocalizadas (MEECG), se ejecuta un proceso de búsqueda, de tal manera que, se pueda establecer la relación existente entre cada ECP observando restricción de distancia máxima habilitante δ . Una vez establecida dicha relación se da origen a la formación de una malla habilitante ψ , con la cual, se procederá a insertar los pesos del flujo α en cada opción habilitada desde una ECP X_i a una X_j . El algoritmo 2, Búsqueda de Camino Restringido (BCR), es un método con el cual se hace posible buscar todas las opciones posibles en una

intersección Δ_p verificando constantemente los valores de δ hasta encontrar al menos una ECP disponible. Este proceso se ejecuta para cada sitio candidato, obteniendo un vector solución ξ por cada caso. Finalmente, mediante la tabla 2 presentamos un resumen de las variables usadas en el artículo propuesto.

Algoritmo 1. MEECG – Mínimo Emplazamiento de Estaciones de Carga Geolocalizadas

Paso 1: Variables

$$X_{ij}, Z_{ij}, \delta, \alpha$$

Paso 2: Leer OSM

openstreetmap

Paso 3: Mínima distancia habilitante

For $k \leftarrow$ longitud (X_{ij})

$$[\sigma_k] = \text{BCR}(\delta, X_{ij})$$

endfor

Paso 4: Escritura Función Objetivo

Paso 5: Escritura Restricciones

Paso 6: LpSolve

Algoritmo 2. BCR - Búsqueda de Camino Restringido: recibe (δ, X_{ij})

Paso 1: Variables

$$\Delta_{int}, \delta, X_{ij}, \beta, \xi$$

Paso 2: Encontrar Ruta

while flag == 1

$$\Delta_{dv} = \text{haversine}(X_{ij})$$

$\Delta_p \leftarrow$ Opciones de búsqueda en cada intersección

$$\Delta_{dv} = \Delta_{dv} + \Delta_{dv}$$

$$\xi = \text{encontrar_rutas}(\beta, \Delta_p)$$

$$d_f = \text{haversine}(\xi)$$

$$\sigma = [\xi \ d_f]$$

if $\Delta_{dv} \geq \delta$

flag = 0; retorna(σ)

endif

endwhile

Con la ecuación 1 se presenta la función objetivo del problema. Donde, σ_{ij} corresponde a la relación existente desde una ECP X_i hacia una X_j , mismas que, al

multiplicarle por un vector de pesos (costos) α el modelo buscará identificar el mínimo número de ECPs que garanticen el máximo flujo vehicular considerando la capacidad de las vías y que la cantidad de vehículos eléctricos enchufables que entran son los mismos que salen de cada estación de carga.

Para ello, un concepto fundamental es la distribución uniforme de ECP en el área de estudio. Por lo tanto, mediante la distribución uniforme de ECPs se buscará mitigar el posible tráfico generado al tener un alto índice de coincidencia de carga de vehículos. Con la ecuación 2 se garantiza la pertenencia de los sitios candidatos al área sujeta a estudio y se advierte que para poder encontrar relaciones entre ECPs se debe emplazar más de un sitio candidato.

$$\min \sum_{i,j}^n \sigma_{ij} * \alpha \quad (1)$$

Sujeto a:

$$X_{ij} \in A_{(n)}, \forall n > 1 \in \mathfrak{R}^+ \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{i,j} \leq \alpha_{i,j}, \forall n \in \mathfrak{R}^+ \neq 0 \quad (3)$$

$$d_f \leq \delta, \forall d_f, \delta \in \mathfrak{R}^+ \neq 0 \quad (4)$$

$$d = 2R \operatorname{asin} \sqrt{\begin{matrix} \sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) \\ + \cos(lat1) \cos(lat2) \\ + \sin^2\left(\frac{\Delta lon}{2}\right) \end{matrix}} \quad (5)$$

Mediante la ecuación 3 se expresa que la sumatoria del flujo acumulado de cada relación entre ECPs debe ser menor o igual a los flujos considerados para la optimización y sobre los cuales se obtendrá el vector resultante σ . Con la ecuación 4 se advierte que la distancia final habilitante debe ser exclusivamente igual o menor a la distancia habilitante δ . Adicionalmente, con la ecuación 5 se establece las condiciones necesarias para reducir la distancia máxima de alcance que un operador de un VEE deberá conducir hasta encontrar un punto de carga. Finalmente, con la ecuación 5 se calcula la distancia de haversine. Donde d es la distancia en kilómetros de una ECP X_i a X_j , lat y lon representan la latitud y longitud respectivamente, $lat1$ y $lon1$ son las coordenadas de un sitio candidato inicial y $lat2$, $lon2$ corresponden a las coordenadas de un sitio candidato final, Δlat es la diferencia entre las coordenadas de

latitud del punto i y Δlon es la diferencia entre las longitudes del punto j y, finalmente R es el radio de la tierra, con un valor de 6372.7955 km.

4. Análisis de resultados

En esta sección se presenta los resultados obtenidos de las simulaciones ejecutadas bajo las consideraciones expuestas en la tabla 3. En la figura 2 se puede apreciar el rendimiento del algoritmo en función de la variación de la longitud máxima habilitante permitida para seleccionar al potencial vector solución resultante. Este vector solución contendrá las posiciones en latitud y longitud de cada ECP candidato; esta distancia máxima habilitante es verificada mediante el *software Matlab* aplicando la ecuación 5 y establece la relación entre todos aquellos sitios candidatos que cumplen el criterio de distancia, cuya longitud sea menor o igual a δ . En la figura 2a, la métrica de color azul, representa el número de enlaces entre aquellos sitios candidatos para emplazar estaciones de carga que alcanzaron a satisfacer la restricción de distancia habilitante, los cuales, mediante la función objetivo seleccionará el vector óptimo maximizando el flujo vehicular bajo distribuciones uniformes geolocalizadas de las ECP. Entiéndase por flujo la cantidad de vehículos, en circulación bidireccional, sobre la vía pública. En este sentido, se maximiza el flujo vehicular reduciendo al máximo la necesidad de emplazar ECP.

Además, se puede verificar que existe una mínima longitud que permitirá al modelo poder establecer.

Tabla 3. Parámetros de simulación

Despliegue	Densidad de ECP	105 ECP/km ²
	Área de estudio	0.124 km ²
	Área geográfica	Urbano
	Ubicación de ECP	Georreferenciado
Aplicación	Distancia habilitante	Variable km ²
	Pesos por flujo	Variable
	Tipo de carga	AC – DC
	Niveles de voltaje	230, 400, 500 y 600 V

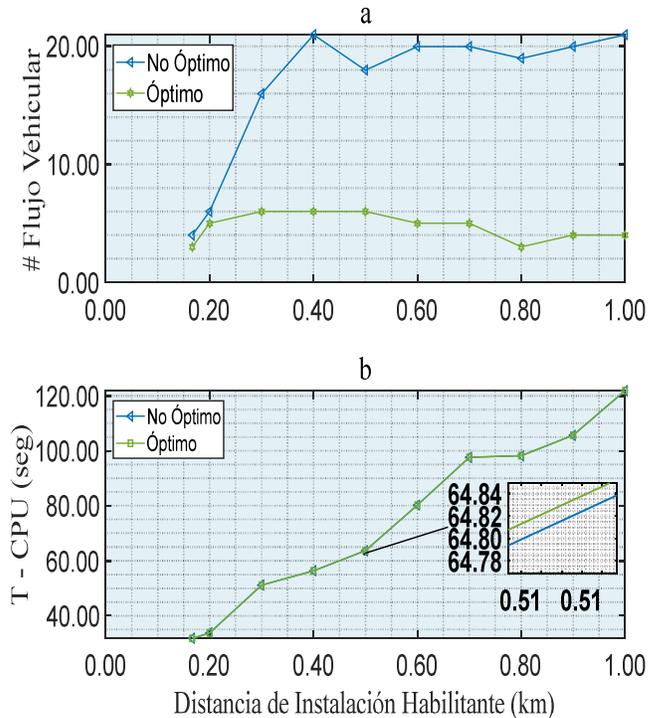


Figura 2. a) Número de rutas habilitadas en función de la distancia habilitante y b) tiempo de máquina (CPU - time) empleado para encontrar la solución en función de la distancia. Fuente Autor.

relaciones longitudinales entre cada sitio candidato, es decir, no puede existir longitudes inferiores, que para el caso es de 0.165 km, puesto que, no existirá la posibilidad de relacionar las ECP entre si anulando la posibilidad de encontrar un mesh pre-factible. Es de mucha importancia citar que, el mesh factible se lo consigue con el cúmulo de distancias medidas por las rutas de las vías que asocian a cada ECP durante la exploración.

Las distancias son calculadas mediante la ecuación de haversine (ver ecuación 5) considerando latitud y longitud de las posiciones individuales de cada ECP, arrojando como resultado longitudes reales en kilómetros. Además, en la figura 2a se puede apreciar que de 0.165 a 0.4 km existe un incremento considerable de enlaces geolocalizadas que relacionan al conjunto candidato inicial de ECPs. En consecuencia, inicialmente se selecciona sitios candidatos, posteriormente, mediante el *software Matlab*, se establece la relación entre cada ECP observando la restricción máxima distancia habilitante y finalmente aquellos nodos habilitados como posibles soluciones son ingresados en el *software LpSolve* con sus respectivos pesos de flujos de enlace, otorgándonos como resultado la línea de color verde (ver

figura 2); esta métrica representa el conjunto solución en función de la variación de la distancia habilitante y, es notorio que, se ha logrado prescindir de relaciones con algunas ECPs innecesarias. Estas relaciones son proporcionales al número de ECPs a emplazarse.

Adicionalmente, a medida que la distancia se acerca a un máximo, se reduce el número de relaciones reduciendo paralelamente la necesidad de emplazar ECPs en el área de análisis. Finalmente, mediante la figura 2b se vislumbra que a medida que aumenta la restricción de distancia habilitante aumenta proporcionalmente el tiempo en el que el ordenador logra encontrar una solución, esto sucede porque a medida que aumenta las distancias el número de exploraciones también lo hace, permitiéndonos así, aumentar el número de exploraciones que deberá ejecutar el algoritmo. La diferencia entre la tendencia no óptima y óptima (ver figura 2b) representa el tiempo de máquina empleado por el *software LpSolve* para encontrar la solución óptima.

La solución proporcionada por dicho *software* se lo lleva nuevamente al entorno de Matlab con la finalidad de reconstruir, en el mapa georreferenciado, la solución proporcionada por el optimizador.

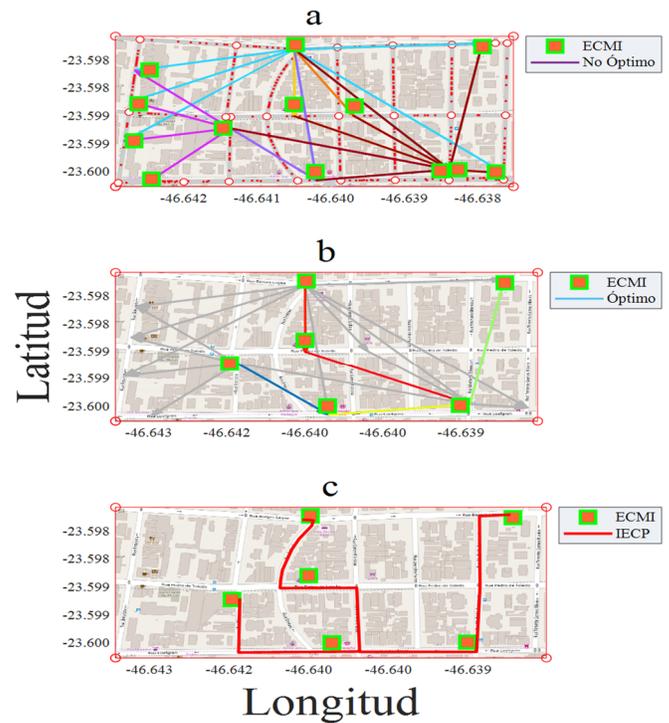


Figura 4. a) rutas alcanzadas bajo restricción de distancia de habilitación 0.6 km, b) rutas cercanas al óptimo y c) vía habilitada. Fuente Autor.

A continuación, presentamos las soluciones gráficas en función de la variación de la longitud habilitante considerando flujo vehicular. Es muy importante mencionar que las figuras 3, 4, 5 y 6 en sus tres casos de estudio (a, b y c) expresan la variación topológica que experimenta el emplazamiento de las ECPs a medida que varía la longitud habilitante, además, se fija (vector de pesos único en cada análisis) la tasa de flujo para todos los casos.

En las figuras 3a, 4a, 5a y 6a se presenta los escenarios alcanzados, en el que el *software Matlab*, encuentra las relaciones y direcciones habilitadas que potencialmente podrán formar parte del vector solución definitivo, el cual, será determinado por el *software LpSolve* observando los pesos de cada flujo. De la misma manera, las figuras 3b, 4b, 5b y 6b representan al conjunto solución definitivo obtenido por el solver de optimización. Es de mucha importancia citar que en estos casos (3b, 4b, 5b y 6b) las flechas representan las direcciones de los flujos necesarios, por lo que, de ahí no se puede obtener las distancias reales que un operador de VEEs debe desplazarse hasta alcanzar un punto de carga.

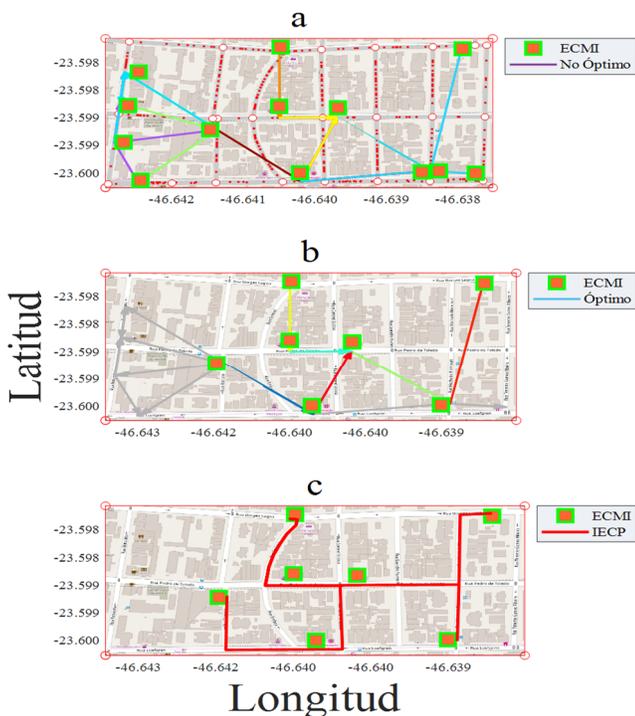


Figura 3. a) rutas alcanzadas bajo restricción de distancia de habilitación 0.4 km, b) rutas cercanas al óptimo y c) vía habilitada. Fuente Autor.

Tabla 2. Caracterización del comportamiento del modelo propuesto. Fuente Autor

Escenario	# ECP Emplazados	Distancia habilitante (km)	# ECP Activos	% ECP requeridas del número total desplegado	Distancia Promedio (km)
1	13	0.165	5	38.46	0.0408
2		0.2	8	61.54	0.0645
3		0.3	7	53.85	0.1356
4		0.4	7	53.85	0.1356
5		0.5	7	53.85	0.1356
6		0.6	6	46.15	0.1587
7		0.7	6	46.15	0.1587
8		0.8	4	30.78	0.1536
9		0.9	5	38.46	0.1943
10		1	5	38.46	0.1943

Finalmente, en las figuras 3c, 4c, 5c y 6c se presenta, a más de los sitios óptimos observando restricciones para el emplazamiento de las EC, las rutas mínimas por las que el operador del vehículo podría optar para su desplazamiento. Adicionalmente, al ser una ruta de costo mínimo se podría aprovechar para la inclusión de la ruta del tendido eléctrico, el cual, puede ser soterrado y a su vez se podría considerar el tendido de fibra óptica, formando así IECP inteligentes; recordemos que a mayor adquisición de datos o información de cualquiera que sea la infraestructura, mejor gestión podemos ejercer sobre el mismo, logrando predecir comportamientos en función de patrones de comportamiento de la infraestructura.

Otro dato de interés que se puede apreciar es que a medida que aumenta la restricción δ , la distribución de las EC, tienden a distribuirse de manera uniforme en el área ensayada y el número requerido de ECPs se reduce; esto se debe ya que existe relación directa con la distancia de alcance del vehículo eléctrico, es decir, a mayor libertad de desplazamiento mayor será las longitudes promedio a las que se debe emplazar las ECPs, de tal manera que minimice el impacto social (ansiedad) por alcance que puede generar en el conductor. De la misma manera, las figuras 3, 4, 5 y 6 sugieren que, si las distancias de alcance de los vehículos son reducidas, se debe emplazar un mayor número de ECPs.

Por lo tanto, estas métricas desvelan la importancia y el papel fundamental que juega el diseño de las baterías, puesto que son las responsables de la autonomía de los VEEs. Paralelamente a nivel social, el modelo presentado se configura como un elemento importante para

incentivar a los potenciales consumidores para la adquisición de estas nuevas alternativas de movilidad, puesto que, mediante esta investigación se puede satisfacer de cobertura de recarga vehicular mediante el uso de múltiples instalaciones de carga, las mismas que, se ajustan a las necesidades variantes de los operadores de los VEEs.

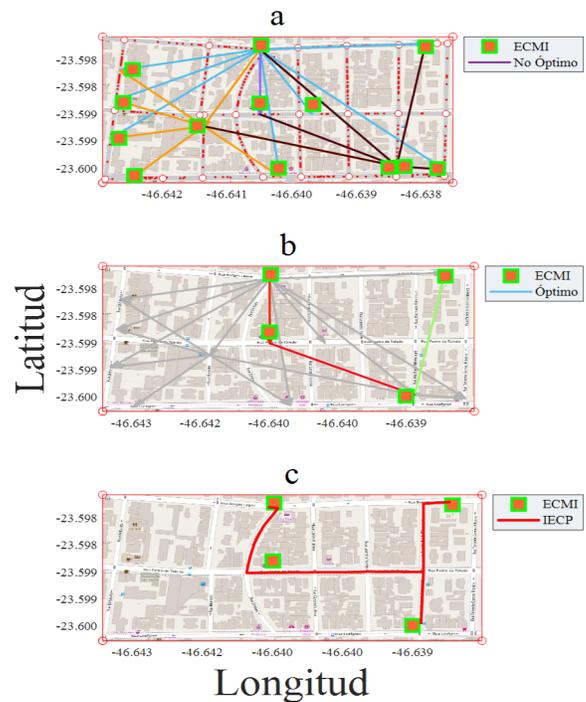


Figura 5. a) rutas alcanzadas bajo restricción de distancia de habilitación 0.8 km, b) rutas cercanas al óptimo y c) vía habilitada. Fuente Autor.

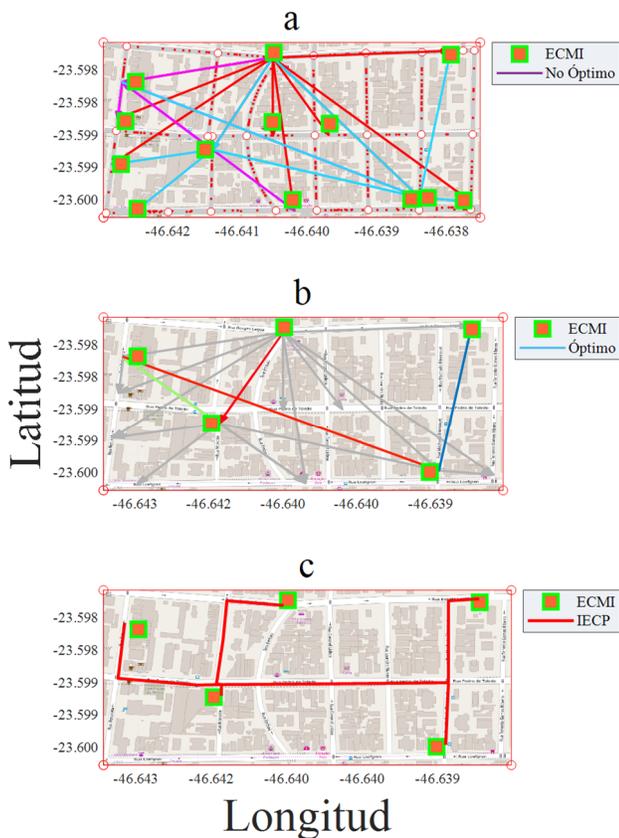


Figura 6. a) rutas alcanzadas bajo restricción de distancia de habilitación 1 km, b) rutas cercanas al óptimo y c) vía habilitada. Fuente Autor.

Mediante la tabla 4 se evalúa la capacidad del algoritmo para generar escenarios sujetos a condiciones iniciales que nos permita evaluar el comportamiento de la IIECP. Se han ensayado 10 casos diferentes fijando el número de ECPs, así como también se fija los pesos del flujo que relaciona a todas las ECPs entre sí. El número de ECPs activos (que son parte del conjunto solución) son notablemente inferiores al número de sitios candidatos emplazados como condición inicial. Por lo tanto, mediante la heurística propuesta se ha logrado reducir la necesidad de emplazar ECPs observando restricciones de distancias habilitantes y flujo vehicular. En la columna 5 de la tabla 4 se pone de manifiesto el porcentaje máximo necesario para emplazar y formar IIECPs en referencia al número de sitios candidatos desplegados inicialmente. Por lo tanto, es evidente la capacidad del modelo propuesto para seleccionar el conjunto solución idóneo de un subconjunto de sitios candidatos distribuidos en el área de estudio.

Finalmente, en la columna 6 se presenta la distancia promedio en el que un VEE deberá desplazarse en función de su autonomía hasta encontrar una ECP disponible.

Por lo tanto, queda demostrado la potencialidad del modelo propuesto y su flexibilidad ante la generación de casos de estudio variando parámetros iniciales reales tales como: i) distancia máxima habilitante y ii) tasas de flujo. Adicionalmente, empleando los softwares *Matlab* y *LpSolve* hemos logrado alcanzar el objetivo planteado en la presente investigación.

5. Conclusiones

Con la presente investigación se ha demostrado que mediante una adecuada planificación y la observación de restricciones puntuales se puede ensayar el despliegue de centros de carga, de tal manera que, se logre no solo ubicar en posiciones óptimas, sino que, permita dimensionar su capacidad y el número mínimo a desplegarse en función del flujo que deberá atender cada estación de carga. Otras variables de suma importancia a ser considerado es el análisis de las diferentes tecnologías de carga disponibles para el emplazamiento óptimo de las ECP, puesto que, las IIECP comprometen al sistema eléctrico tradicional debido a la magnitud de energía demandada en intervalos relativamente pequeños durante el periodo de recarga.

En futuros trabajos se evaluará la topología resultante, empleando estudios probabilísticos y teoría de colas para lograr determinar la capacidad y tipos de terminales de carga a emplazarse en cada ECP, con la finalidad de reducir al máximo el tiempo de estacionamiento del VEE.

6. Agradecimiento

Este trabajo ha sido producido gracias al apoyo de GIREI - Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes de la Universidad Politécnica Salesiana Ecuador, bajo el proyecto Despliegue óptimo de electrolineras basado en flujo vehicular requerido para ciudades inteligentes.

7. Referencias

- [1] M. M. Islam, H. Shareef, and A. Mohamed, "Optimal siting and sizing of rapid charging station for electric vehicles considering Bangi city road network in Malaysia," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 5, pp. 3933–3948, 2016.
- [2] S. Guo and H. Zhao, "Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on

- sustainability perspective,” *Appl. Energy*, vol. 158, pp. 390–402, 2015.
- [3] Z. H. Zhu, Z. Y. Gao, J. F. Zheng, and H. M. Du, “Charging station location problem of plug-in electric vehicles,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 52, pp. 11–22, 2016.
- [4] Z. Lu, Tianqi; Ma, Qiang; Gu, “EV Charging Station Placement Considering Traffic Flow,” 2016, no. Icimm, pp. 186–192.
- [5] T. Chen, K. Kockelman, and M. Khan, “Locating Electric Vehicle Charging Stations,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2385, no. December 2013, pp. 28–36, 2013.
- [6] M. C. Catalbas, M. Yildirim, A. Gulen, and H. Kurum, “Estimation of optimal locations for electric vehicle charging stations,” *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. EEEIC / I CPS Eur. 2017*, pp. 1–4, 2017.
- [7] C. Lee and J. Han, “Benders-and-Price approach for electric vehicle charging station location problem under probabilistic travel range,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 106, no. November, pp. 130–152, 2017.
- [8] C. Kong, R. Jovanovic, I. S. Bayram, and M. Devetsikiotis, “A hierarchical optimization model for a network of electric vehicle charging stations,” *Energies*, vol. 10, no. 5, pp. 1–20, 2017.
- [9] M. M. Islam, A. Mohamed, and H. Shareef, “Optimal allocation of rapid charging stations for electric vehicles,” *2015 IEEE Student Conf. Res. Dev. SCORed 2015*, no. March 2017, pp. 378–383, 2015.
- [10] S. Hosseini and M. D. Sarder, “Development of a Bayesian network model for optimal site selection of electric vehicle charging station,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, no. April 2018, pp. 110–122, 2019.
- [11] Y. Yan, J. Jiang, W. Zhang, M. Huang, Q. Chen, and H. Wang, “Research on Power Demand Suppression Based on Charging Optimization and BESS Configuration for Fast-Charging Stations in Beijing,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 8, p. 1212, 2018.
- [12] C. C. Lin, D. J. Deng, C. C. Kuo, and Y. L. Liang, “Optimal Charging Control of Energy Storage and Electric Vehicle of an Individual in the Internet of Energy With Energy Trading,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 6, pp. 2570–2578, 2018.
- [13] J. Hu, H. Morais, T. Sousa, and M. Lind, “Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1207–1226, 2016.
- [14] Q. Zhang, W. Xu, W. Liang, J. Peng, T. Liu, and T. Wang, “An improved algorithm for dispatching the minimum number of electric charging vehicles for wireless sensor networks,” *Wirel. Networks*, no. May, 2018.
- [15] N. Leeprechanon, P. Phonrattanasak, and M. K. Sharma, “Optimal planning of public fast charging station on residential power distribution system,” *2016 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2016*, no. November 2017, pp. 519–524, 2016.
- [16] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu, and Y. Song, “An Integrated Planning Framework for Different Types of PEV Charging Facilities in Urban Area,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 5, pp. 2273–2284, 2016.
- [17] L. Gong, Y. Fu, and Z. Li, “Integrated planning of BEV public fast-charging stations,” *Electr. J.*, vol. 29, no. 10, pp. 62–77, 2016.
- [18] H. Zheng and S. Peeta, “Routing and charging locations for electric vehicles for intercity trips,” *Transp. Plan. Technol.*, vol. 40, no. 4, pp. 393–419, 2017.
- [19] X. Wang, C. Yuen, N. U. Hassan, N. An, and W. Wu, “Electric Vehicle Charging Station Placement for Urban Public Bus Systems,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 128–139, 2017.
- [20] M. Akbari, M. Brenna, and M. Longo, “Optimal locating of electric vehicle charging stations by application of Genetic Algorithm,” *Sustain.*, vol. 10, no. 4, 2018.
- [21] C. Luo, Y. F. Huang, and V. Gupta, “Placement of EV Charging Stations-Balancing Benefits among Multiple Entities,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 759–768, 2017.
- [22] B. Do Chung, S. Park, and C. Kwon, “Equitable distribution of recharging stations for electric vehicles,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 63, pp. 1–11, 2018.
- [23] J. Yang, L. He, and S. Fu, “An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid,” *Appl. Energy*, vol. 128, pp. 82–92, 2014.
- [24] H. Zang *et al.*, “Bi-Level Planning Model of Charging Stations Considering the Coupling Relationship between Charging Stations and Travel Route,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 7, p. 1130, 2018.
- [25] H. Sun, J. Yang, and C. Yang, “A robust optimization approach to multi-interval location-inventory and recharging planning for electric vehicles,” *Omega (United Kingdom)*, vol. 0, pp. 1–17, 2018.
- [26] G. Cuesta Capellan, “Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de categoría L7 tipo Smart.” ETSEIB, Barcelona, 2017.
- [27] A. Martín Pérez, “Guía del Vehículo Eléctrico,” *Fund. la Energía la Comunidad Madrid. Conserjería Econ. y Hacienda la Comunidad Madrid, Espana.*, pp. 70–95, 2009.
- [28] E. Inga, M. Campaña, R. Hincapié, and O. Moscoso-Zea, “Optimal deployment of FiWi networks using heuristic method for integration microgrids with smart metering,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 8, Aug. 2018.
- [29] M. Campaña, E. Inga, and R. Hincapié, “Optimal placement of universal data aggregation points for smart electric metering based on hybrid wireless,” in *CEUR Workshop Proceedings*, 2017, vol. 1950, pp. 6–9.
- [30] E. Inga, M. Campana, R. Hincapie, and S. Cespedes, “Optimal placement of data aggregation points for smart metering using wireless heterogeneous networks,” *2018 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2018 - Proc.*, no. Mi, 2018.