Optimización Multi-objetivo Aplicada a la Planificación de Instalación de Estaciones de Carga para Vehículos Eléctricos

John Carabalí¹, Carlos Barrera-Singaña^{2,*}

¹Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador ²Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2022 — Fecha de aceptación: 15 de noviembre de 2022

Resumen

La óptima ubicación de electrolineras es un reto para constructores y diseñadores de redes eléctricas. Por este motivo, en la presente investigación, se propone el método ϵ -restringido capaz de resolver problemas multiobjetivos. Este método minimiza las pérdidas de potencia activa y maximiza el flujo de tráfico vehicular capturado simultáneamente. Además, se determinan las ubicaciones óptimas georreferenciadas de las estaciones de carga elegidas. Los resultados de las simulaciones, muestran que el cambio de ubicación de las electrolineras, genera mayor impacto en la cantidad de tráfico vehicular capturado que sobre las pérdidas de potencia en la red de subtransmisión.

Palabras Clave: FCLM, método ϵ -restringido, OPF, Vehículo eléctrico.

Multi-objective Optimization Applied to Electric Vehicle Charging Station Installation Planning

Abstract

The optimal location of electric charging stations is a challenge for builders and designers of electrical networks. For this reason, in this research, the ϵ -constraint method capable of solving multi-objetive problems is proposed. This method minimizes the vehicular traffic flow captured simultaneously. In addition, the chosen charging stations optimal georeferenced locations are determined. The simulations results show that charging stations locations changing generates a greater impact on the vehicle traffic captured amount than on the subtransmission network power losses.

Keywords: FCLM, ϵ -constraint method, OPF, Electric vehicle.

1. Introducción

La ubicación óptima de las electrolineras representa un desafío para la sociedad actual, en la medida en que la instalación de éstas se planifique de manera adecuada, aumentará la demanda de vehículos eléctricos. Además, si a la par se utilizan energías renovables, se disminuirán los gases de efecto invernadero, tomando en consideración que los vehículos que utilizan combustibles fósiles para su movilización se encuentran entre los contribuyentes mayoritarios en la contaminación medioambiental [1].

Los vehículos eléctricos se han convertido en los últimos años en una opción cada vez mas aceptada por la sociedad. Sin embrago, este sector automovilístico tiene un gran problema, en cuanto a la capacidad de almacenamiento de baterías, ya que estas no permiten a los autos recorrer largas distancias y su período de carga es prolongado. Por esta razón, es indispensable el despliegue óptimo de estaciones de carga para vehículos eléctricos, con el objetivo de incrementar la penetración de estos en el mercado [2].

^{*}cbarrera@ups.edu.ec

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 27, No. 1, 2023, ISSN: 2448-8364

Varios son los parámetros que inciden en la óptima ubicación de una electrolinera, sin embargo, la mayoría de las variables que repercuten en la decisión final son: la red eléctrica, la red de transporte y los costos de instalación y operación, esto se observa en la figura 1 y sus relaciones se describen a continuación.

En las redes eléctricas se presentan una gran cantidad de fallas por la incorporación de estaciones de carga para vehículos eléctricos (ECVE), por ejemplo: sobrecarga del sistema de potencia o desviaciones de voltaje en las líneas de transmisión [3]. En este marco, a medida que la penetración de vehículos eléctricos (VE) aumenta, se requieren más ECVE y por ende mayor será la cantidad de energía consumida a través de la red de distribución.

El estudio realizado en [4] demuestra cómo optimizar la entrega de energía cuando se tiene una gran penetración de VE y mantener las limitaciones de la red. Además, este estudio demuestra que determinar la fase eléctrica en donde se encuentra la ECVE es importante, así como la distancia a la que se encuentra del transformador de potencia.



Figura 1: Parámetros para la ubicación óptima de EC-VE

Otros estudios como el presentado en [5], además de tomar en consideración la penetración en el mercado de vehículos eléctricos, utiliza información de carácter estocástico, como los patrones de conducción, tiempos de carga y características de la carga de la electrolinera. En este contexto, el estudio realizado en [6] demuestra la incidencia de la carga de ECVE sobre: la estabilidad del voltaje de la red y la confiabilidad del sistema. También, demuestra que los buses fuertes en un sistema radial IEEE-33-Bus permiten la inserción de estaciones de carga para vehículos eléctricos sin violar los límites de la red, situación adversa ocurre cuando las estaciones son ubicadas en los buses débiles del sistema.

También, en [7] y [8] se consideran las característi-

cas eléctricas de las estaciones de carga para vehículos eléctricos existentes en el mercado. En la Tabla 1 se presenta un resumen de la información obtenida de la investigación anteriormente mencionada.

Cabe destacar, en la clasificación de la Tabla 1 a las estaciones de carga "ultra-rápida", estas utilizan corriente directa en la transmisión de energía hacia la batería de los autos eléctricos [9], sin embargo, este procedimiento reduce la vida útil de la batería debido al corto período (5 minutos) que le toma cargar el 80% de la misma.

La red de transporte por sus características inherentes, se torna compleja al momento de ser estudiada, mucho más cuando se tiene poca información sobre las variables del sistema vial, por eso tiende a convertirse en un problema estocástico. Sin embargo, en [10] se utiliza un método basado en la recopilación de datos gracias a la tecnología GPS integrada en el smartphone. También, se analizan las llamadas celulares realizadas en un período aproximado de un mes, luego, se estudian los resultados y se determinan las principales rutas de tráfico. Toda esta información junto al análisis de movilidad humana, dan como resultado una proyección para la ubicacción de ECVE, sin necesidad de utilizar datos de los vehículos. Hay que tomar en consideración, que la resolución por computadora de este problema es muy complejo, y por este motivo se utiliza un algoritmo genético como método de solución del problema.

En cambio, la investigación desarrollada en [2], utiliza el método tradicional de la encuesta para obtener la información de los viajes automovilísticos. Como resultado se obtienen los datos de origen-destino en una zona determinada. Posteriormente, se obtiene la distancia promedio recorrida por vehículo eléctrico y, finalmente se analiza la penetración de VE en un futuro cercano.

Es importante resaltar, el estudio realizado en [11], donde se propone un algoritmo genético tradicional, disminuyendo la pérdida de potencia activa en la red; por otro lado, en [12], se plantea un algoritmo genético mejorado junto a la estrategia PSO, mejorando el perfil de voltaje en el sistema de prueba.

Adicionalmente, el estudio realizado en [13] se busca maximizar el flujo de tráfico capturado por medio de un algoritmo que toma en consideración el flujo por rutas y la distancia promedio que puede recorrer el vehículo. Los investigadores demuestran que al distribuir las EC-VE en los centros de transporte se maximiza el tráfico vehicular capturado. Por otra parte, en [14] se maximiza el flujo de tráfico capturado a través del modelo UTAM, el cual trabaja con flujos en entornos reales.

En este contexto, en [15] desarrollan un modelo para optimizar la ubicación de electrolineras. En la investigación se encuentran con el problema de la incertidumbre de la demanda de recarga. Utilizan el modelo de localización de captura de flujo de tráfico (FCLM por sus siglas en inglés). Además, demuestran que a medida en que aumenta el número de estaciones de recarga, estas se ubican en el centro urbano y tienden a superponerse. En adición, en [13] y [16] utilizan el modelo del flujo de tráfico conjuntamente con la red eléctrica de distribución, con lo cual, el problema se convierte en multi-objetivo.

Tabla 1: Características Eléctricas de distintas ECVE

Tipo Cargador	Voltaje Límite (V)	Corriente Límite (A)	Tecnología de carga	Potencia Límite (kW)
Lenta Semi-Rápida Rápida Ultra-Rápida	$\begin{array}{c} 230 \ (1\phi) \\ 230 \ (1\phi) \\ 400 \ (3\phi) \\ 2000 \end{array}$	$16 \\ 16 \\ 96 \\ 125$	AC AC AC DC	$3.6 \\ 3.6 \\ 50 \\ 150$

Para resolver el problema, por un lado en [16], propone un análisis envolvente de datos conjuntamente con el método de entropía cruzada, esto logra determinar la ubicación óptima de la ECVE. En contraste, en [13] se plantea el uso de un algoritmo genético para resolver la función objetivo, este estudio además procura reducir las pérdidas de energía y las desviaciones de voltaje. Cabe resaltar, que ambas investigaciones realizan estudios de caso con redes eléctricas y red vehícular reales.

El aspecto económico es el más variable en las investigaciones de esta temática, debido a que está sujeto a parámetros que dependen de la zona en donde se ubican las ECVE y, además, el precio de la electricidad es establecido por cada gobierno, lo que complica el problema aún más. Entre las principales restricciones en la planificación de estaciones de carga para vehículos eléctricos tomando en consideración el aspecto económico, se pueden encontrar a los costos de mantenimiento, costos por operación y costos por pérdidas de energía [1].

La investigación de [17] desarrolla un algoritmo capaz de encontrar el menor costo posible de una ECVE considerando como funciones objetivos tanto la red eléctrica como la de tráfico. Por otro lado, el estudio realizado en [7] enfatiza en los beneficios económicos del propietario de la electrolinera. Esta investigación detalla mediante el cálculo del retorno de la inversión (ROI), cómo influyen en la rentabilidad de la misma variables cómo: la tarifa de cobro en la estación de carga, la capacidad eléctrica, y las tasas de utilización. En consecuencia, demuestran que la penetración de vehículos eléctricos en el mercado es determinante e incide en la demanda de ECVE, igual resultado se obtuvo en [18].

En este marco, el estudio realizado en [9], maximiza la cobertura y minimiza el costo total de la ECVE. Esto se logra al utilizar una metaheurística conocida como optimización por enjambre de partículas (PSO), y posteriormente determina una solución aproximada al frente de Pareto entre las funciones objetivos. Sin embargo, al momento de analizar la curva de Pareto entre la cobertura y los costos totales de la estación se presenta el efecto de cambio de economías de escala.

Cabe resaltar, la investigación en donde se busca mi-

nimizar el costo social total en la instalación de EC-VE [19], optimizando tanto su diseño como la ubicación, considerando factores influyentes como tráfico de transporte, costo de construcción, precio de la tierra y condiciones de la red de potencia. Los investigadores de este estudio, utilizan el método de toma de decisiones para encontrar la solución óptima del problema, tal como se desarrolla en [20].

Es importante recalcar en este punto, que la presente investigación, se enfoca en el problema de manera novedosa; a través de la Ecuación (10), permite combinar y optimizar el sistema eléctrico y la red vehicular, considerando datos reales de ambas redes.

2. Metodología

El objetivo principal de la presente investigación es obtener la mejor ubicación georeferenciada de un número determinado de estaciones de carga para vehículos eléctricos. Para lograrlo, se busca reducir al mínimo las pérdidas de potencia activa al introducir las ECVE en el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y, también, maximizar la capacidad de servicio de la electrolinera, capturando la mayor cantidad de flujos vehiculares.

Debido a que se trabaja con dos funciones objetivos con tendencias contrarias (minimizar y maximizar), el problema debe ser resuelto a través de la optimización multiobjetivo.

La información de la red vehicular se obtiene a través de la plataforma de software libre OpenStreetMap. Esta información se ingresa a MATLAB junto a los datos de la red eléctrica extraídos desde el Geoportal de EERCS. En el entorno de MATLAB se prepara el modelo en base a las restricciones de las funciones objetivos. Por un lado, se utiliza el algoritmo de agrupamiento K-medoids para definir los centroides de las zonas de tráfico vehicular y, relacionar los nodos dentro de sus dependencias. Por otro parte, el algoritmo de Dijkstra permite determinar los caminos(enlaces) más cortos entre las zonas en cuestión. Para resolver el problema de optimización por ser multi-objetivo, se utiliza el Sistema General de Modelaje Algebraico (GAMS), diseñado para resolver problemas lineales, no lineales y enteros mixtos.

A continuación, se describen los modelos matemáticos que permiten maximizar el flujo de tráfico, minimizar las pérdidas de potencia activa y, finalmente, se describe el modelo de optimización multi-objetivo de Pareto.

2.1. FCLM

El modelo de ubicación de captura de flujos o FCLM por sus siglas en inglés, desarrollado en [21], propone capturar la mayor cantidad de flujo en los nodos de una red vehicular. Es necesario definir la palabra "capturar", que para este modelo tiene la conotación de flujo cubier-

to, o en otras palabras, el flujo que atraviesa un nodo desde un origen hacia un destino. Además, se define a los enlaces como todos los caminos posibles en la red, v de igual manera, a los nodos como las intersecciones entre dos o más enlaces. Cabe mencionar varias consideraciones que se realizan al aplicar este modelo:

- Ausencia de carreteras divididas y penalizaciones de la red de tráfico.
- Trayectorias directas sin posibilidad de salirse de los enlaces.
- Descartar el alto valor de los terrenos en las intersecciones de enlaces(nodos).
- Los nodos de la red de tráfico son las ubicaciones potenciales de las instalaciones.

En este contexto, el modelo determina las p cantidad de instalaciones que de manera conjunta capturan la mayor cantidad de flujo en la red eléctrica. En un escenario con n nodos, cada uno de estos se convierte en una ubicación potencial para la instalación, desde donde además, pueden iniciar y/o terminar enlaces. La suma de todos los pares orígen-destino determina la demanda en la red [22]. Estos datos se consideran en el primer proceso del algoritmo, como se observa en la Figura 2. Matemáticamente el modelo se expresa así:

Maximizar:

$$FO_f = \sum_{q=1}^{Q} f_q y_q \tag{1}$$

 $sujeto \ a:$

$$\sum_{k}^{N_q} x_k \ge y_q \quad \forall q \in Q \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_k = p \tag{3}$$

 $en \ donde$:

q: par de origen - destino cualesquiera.

Q: conjunto de todos los pares origen — destino.

 f_a : flujo entre un par de origen – destino.

 N_q : conjunto de nodos capaces de capturar f_q . $y_q = \begin{cases} 1 \ si \ f_q \ es \ capturado. \\ 0 \ en \ caso \ contrario \end{cases}$

- k: ubicación potencial para una instalación.
- K: conjunto de ubicaciones potenciales.

$$x_k = \begin{cases} 1 \ si \ la \ instalación \ es \ colocada \ en \ k. \\ 0 \ en \ caso \ contrario \end{cases}$$

p: número de instalaciones a ser ubicadas.

La función objetivo (1), propone capturar la mayor cantidad de flujo posible, esto sucede siempre y cuando los flujos f_q en la trayectoria q son capturados, osea que exista al menos una instalación x_k en este camino (2). Además, la cantidad de instalaciones en los nodos x_k están limitadas por el número p(3), que depende directamente de la penetración vehicular del entorno [23].

Flujo Óptimo de Potencia 2.2.

El flujo óptimo de potencia u OPF por sus siglas en inglés, es una estrategia que permite determinar los valores ideales de las variables en una red eléctrica, sujeta a ciertos parámetros de diseño. Fue introducido por primera vez en los estudios llevados a cabo por Carpentier en 1962 [24]. Entre las funciones objetivo que esta estrategia puede optimizar, se encuentra la pérdida de potencia activa. En [25] se describe al problema de minimización de pérdidas de energía como no lineal entero mixto, además, se presenta la expresión matemática que lo define, esta se observa en la ecuación (4).

Minimizar:

$$FO_P = \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} G_{nm} [V_n^2 + V_m^2 - 2V_n V_m \cos(\theta_{nm})] \quad (4)$$

sujeto a:

$$P_{Gn} - P_{Dn} - P_{EVn} - P_{nm}(V_n, \theta_{nm}) = 0 \quad \forall n \in N$$

$$Q_{Gn} - Q_{Dn} - Q_{nm}(V_n, \theta_{nm}) = 0 \quad \forall n \in N$$
 (5)

$$P_{Gn}^{min} \le P_{Gn} \le P_{Gn}^{max} \quad \forall n \in N \tag{6}$$

$$Q_{Gn}^{min} \le Q_{Gn} \le Q_{Gn}^{max} \quad \forall n \in N \tag{7}$$

$$V_n^{min} \le V_n \le V_n^{max} \quad \forall n \in N$$
(8)

 $en \ donde$:

N: número de barras del sistema.

 V_n : voltaje de la barra n.

 V_m : voltaje de la barra m.

 G_{nm} : conductancia de la línea entre n y m.

 θ_{nm} : diferencia de ángulo de voltaje entre n y m.

 P_{Gn} : potencia act. producida por el generador n.

 Q_{Gn} : potencia react. prod. por el generador n.

 P_{Dn} : potencia activa demandada por la barra n.

 Q_{Dn} : potencia react. demandada por la barra n. P_{nm} : flujo de potencia activa en la línea nm. Q_{nm} : flujo de potencia reactiva en la línea nm. P_{EVn} : potencia activa demandada por ECVE en n.

En este contexto, el problema presenta varias restricciones propias de la red eléctrica, tales como flujos de potencia activa y reactiva, los cuales, están determinados por las ecuaciones descritas en (5). Cabe resaltar, que el problema de flujos de potencia se resuelve a través del método Newton-Raphson, para lo cual, los voltajes de barra y las admitancias de línea se expresan en forma polar y por unidad (p.u). Vale mencionar, que las barras hacen referencia al punto eléctrico de conexión en cada subestación. Por otro lado, las ecuaciones (6) y (7) restringen la potencia activa y reactiva entregada por los generadores conectados a una barra del SEP, respectivamente. Además, la ecuación (8) mantiene la magnitud del voltaje en cada barra dentro de los límites establecidos por los organismos de control eléctrico de cada país. Los superíndices "max" y "min" en las ecuaciones (6), (7) y (8) simbolizan los límites superior e inferior de las restricciones, correspondientemente.

El problema a resolver consiste en determinar en cual de las N barras del SEP se deben ubicar las p electrolineras. Esto se lleva a cabo a través de un proceso iterativo de cálculo de flujos de potencia, en donde, el algoritmo determinará en que combinación de ubicaciones de EC-VE se genera la menor pérdida de potencia activa. Para finalizar, desarrollado el OPF, las variables del sistema como la magnitud V_n y el ángulo θ_n del voltaje se encuentran determinadas, por ende, el problema está completamente resuelto. Posteriormente, como se observa en la Figura 2, los resultados encontrados, son analizados por la estrategia multiobjetivo que se describe a continuación.

2.3. Optimización Multi-Objetivo de Pareto

La optimización multi-objetivo es una técnica que está diseñada para obtener la mejor solución posible dentro de un grupo de factibles resultados, esto, a través de algoritmos capaces de resolver el problema de manera muy simple. Entre los distintos tipos de algoritmos para resolver problemas multi-objetivos (MO) encontramos: los clásicos (cuya base es la programación matemática) y los metaheurísticos. En este marco, determinar el tipo de algoritmo a utilizar tiene mucha relación con el tipo de problema a resolver. Por una parte, los algoritmos clásicos están enfocados en resolver problemas con un solo objetivo, ideales al momento de encontrar una única solución. Sin embargo, en los problemas con objetivos múltiples no existe solo una solución, por el contrario, presentan un grupo de soluciones factibles, lo que es mucho más complejo de resolver. Todas estas soluciones, se determinan de manera directa utilizando algoritmos metaheurísticos, los cuales pueden optimizar todos los objetivos al mismo tiempo [26]. A este grupo de soluciones factibles se las conoce con el nombre de *frente o dominancia de Pareto*.

En la presente investigación para la resolución del problema MO se utiliza el método ϵ -restringido, el cual, consiste en reformular el problema al conservar solo una función objetivo y convertir a la/s restantes en restricciones. Cabe resaltar, que en este método, el diseñador debe elegir la función objetivo que tenga mayor "importancia" en función de parámetros preestablecidos. El método ϵ -restringido puede ser descrito matemáticamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Minimizar \ f_k(x) \mid x \in A(\epsilon) \\ A(\epsilon) &= \{x : x \in A, f_j(x) \leq \epsilon_j, j = 1, ..., m, j \neq k\} \end{aligned}$$

en donde $A(\epsilon)$ representa la región factible inicial del problema de optimización, $f_k(x)$ es la función objetivo preferencial en base a criterios del diseñador, ϵ determina el límite superior de la función $f_j(x)$ y, la variable x contiene el conjunto de soluciones óptimas para el problema [27]. Sin embargo, el problema no está completamente resuelto, antes, se debe tomar la decisión y elegir la "mejor" solución entre las soluciones del frente de Pareto. A primera vista resulta sencillo, pero al observarlo detenidamente es todo lo contrario. Optimizar una función objetivo, equivale a perjudicar la otra. Por este motivo, es indispensable obtener un resultado flexible y acertado que mantenga un equilibrio entre todas la funciones objetivos [28].

El método de satisfacción difuso descrito en [29], es utilizado en esta investigación con el fin de encontrar la solución óptima al problema. Este método consiste en definir una función $\mu_{f_k}(x)$, que calcula el valor de pertenencia con cada una de las soluciones del frente de Pareto x. Mientras más se aproxime al valor de 1 este cálculo, mayor compatibilidad con el conjunto tendrá dicha solución. La siguiente ecuación describe el método propuesto:

$$\mu_{f_k}(x) = \begin{cases} 0 & f_k(x) > f_k^{max} \\ \frac{f_k^{max} - f_k(x)}{f_k^{max} - f_k^{min}} & f_k^{min} \le f_k(x) \le f_k^{max} \\ 1 & f_k(x) < f_k^{min} \end{cases}$$
(9)

Para finalizar, definidos los valores de las funciones de pertenencia, se utiliza la técnica conservadora de toma decisiones *minimax*, propuesta por [30], en la que se busca maximizar los requerimientos mínimos para todas las funciones objetivos. Matemáticamente el proceso de toma de decisiones se puede describir de la siguiente manera:

$$\max_{\forall x \in X} (\min_{\forall k \in K} \mu_{f_k}(x))$$

La metodología desarrollada en la presente investigación se resume en el diagrama de flujo que se observa en la Figura 2, donde, la mayoría de los macro procesos están determinados por una única representación simbólica, para evitar extenderse más de lo necesario.



Figura 2: Diagrama de Flujo Ubicación Óptima ECVE

3. Caso de Estudio

Cuenca es una ciudad ecuatoriana, y es la capital de la provincia del Azuay. Es conocida como la "Atenas" del Ecuador, debido al aporte social de una gran cantidad de personajes intelectuales, deportivos, culturales y políticos. Se encuentra atravesada por cuatro ríos: Tarqui, Tomebamba, Machángara y Yanuncay. La ciudad posee un área de 157 km^2 a una altitud de 2550 msnm y, tiene una población aproximada de 636,996 habitantes.



Figura 3: Área geográfica y red vial de Cuenca

3.1. Información de las Redes Eléctrica y Vehicular

La red de subtransmisión eléctrica del caso de estudio tiene una topología radial y, está a cargo de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS). Este sistema está compuesto por 9 subestaciones de distribución y 15 transformadores de potencia. Cabe resaltar, a las subestaciones S/E 01 y S/E 02 las que distribuyen energía a el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca. Otro aspecto a resaltar, son las subestaciones S/E 06 y S/E Cuenca, estas aportan la generación que alimenta al SEP.

Los voltajes de funcionamiento de las subestaciones al igual que varios parámetros del sistema eléctrico se observan en la Tabla 2. El sistema de distribución tiene 34 alimentadores primarios con un voltaje de operación en su mayoría de 22 kV. Además, el sistema tiene 23.631 transformadores entre monofásicos, bifásicos y trifásicos. Todo el SEP se encuentra interconectado por 14 líneas de transmisión con una longitud de 54,89 km, en su gran mayoría operando a 69 kV. Los datos de las líneas de transmisión se obtienen de [31]. Por otro lado, cada subestación se encuentra ubicada en un punto estratégico con el fin de cubrir la demanda de potencia de los consumidores alojados a su alrededor.

El diagrama unifilar del SEP que se observa en la Figura 4 presenta un bosquejo de sus elementos constitutivos, tales como; cargas de demanda, subestaciones, generadores y las líneas de transmisión que conectan todos los componentes de la red.



Figura 4: Diagrama Unifilar del SEP

Por otra parte, Cuenca presenta un sistema de carreteras rural con una longitud aproximada de 3,493.25 km y, un sistema de vías urbano de 1,097.00 km. La longitud total del viario del cantón asciende a aproximadamente 4,590.25 km. También, la red de carreteras posee 88.016 nodos y 15,358 enlaces. Por un lado, el término nodo hace referencia a las intersecciones entre dos o más carreteras y, por otro, los enlaces definen a los caminos entre un par de nodos. Cabe destacar, que la mayor par-

Código Subestación	Nombre Subestación	Voltaje Entrada (kV)	Voltaje Salida (kV)	Capacidad Máxima (MVA)	Número Transformadores	Número Alimentadores	Potencia Demandada (MW)
S/E 01	Luis Cordero	22.00	6.30	19.00	2.00	4.00	6.19
S/E 02	Centenario	22.00	6.30	19.00	2.00	5.00	8.36
S/E 03	Monay	69.00	22.00	64.00	2.00	5.00	21.85
S/E 04	P. Industrial	69.00	22.00	64.00	2.00	9.00	35.53
S/E 05	El Arenal	69.00	22.00	64.00	2.00	10.00	44.24
S/E 06	Verdillo	69.00	22.00	12.50	1.00	-	-
S/E 07	Ricaurte	69.00	22.00	25.00	1.00	4.00	17.67
S/E 08	Turi	69.00	22.00	32.00	1.00	4.00	14.27
S/E Cuenca	Cuenca	69.00	22.00	100.00	2.00	-	-

Tabla 2: Características de las subestaciones del Sistema Eléctrico de Potencia

te de las vías son de doble sentido, pero en la presente investigación se asumirá que poseen solo uno.

Además, vale enfatizar, que la penetración de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca, según la última estimación, es aproximadamente 4% del parque automotor. Para fines prácticos, en la presente investigación se considera como generadores de tráfico a todo el parque de autos, sin embargo, al flujo capturado por las electrolineras a instalar, debe ser proporcionalizado. Por ejemplo, si el algoritmo determina un flujo de tráfico capturado de 100, se infiere que los autos eléctricos únicamente generarán 4 unidades de flujo vehicular.

En el año 2015 se realiza el Plan de Movibilidad y Espacios Públicos por parte del Ilustre Municipio de la ciudad de Cuenca, en donde se detallan parámetros viales como: carreteras con mayor flujo de tráfico, horas pico de demanda, orígenes y destinos de los viajes vehiculares, entre otros. En este contexto, se definen 64 zonas que generan tráfico desde/hacia la ciudad. Sin embargo, en el análisis de esta investigación se toman en consideración únicamente 23 zonas de tráfico, debido a que los porcentajes de viajes a las zonas externas del cantón son muy bajas y por ende se descartan. Entre las 23 zonas de tráfico se generan 529 enlaces posibles, pero, conviene enfatizar, que estos enlaces se realizan por la ruta más corta. La cantidad de viajes realizados entre las zonas de tráfico (a través de los enlaces) se toman del mencionado plan de movilidad. Sin embargo, el problema resulta muy complejo de resolver, esto, por la gran cantidad de nodos que posee el sistema, por eso, únicamente se toman en consideración los nodos capaces de capturar flujo entre los enlaces. Finalmente, al aplicar los criterios anteriormente definidos, quedan establecidos 568 nodos capaces de capturar tráfico y 529 enlaces. Es necesario subrayar, que elegir la ruta más corta entre las zonas de tráfico no es un escenario realista, pero, si se toma en consideración un modelo más cercano a la realidad, sería muy compleja la resolución del problema. Además, se obvian condiciones inherentes de las carreteras, como giros no permitidos o zonas de congestión.

3.2. Análisis de Resultados

Se realiza la simulación del caso de estudio para cuatro cantidades diferentes de ECVE. En primer lugar se considera la instalación de 4 electrolineras, lo que representa una baja penetración de vehículos eléctricos y, posteriormente, se incrementan dos estaciones de carga sucesivamente. Cabe resaltar, que la simulación se realiza en un computador cuyas características principales son: procesador Intel Core i5-8400, frecuencia de trabajo de 2.81 GHz y 4 GB de memoria RAM.

Se investiga la óptima ubicación de ECVE ultra rápidas (ver Tabla 1), con relación al número de electrolineras instaladas. Se resuelve el algoritmo de optimización ϵ -restringido variando la cantidad de ECVE. Los resultados obtenidos se analizan a continuación. Las ECVE son distribuidas en la periferia de la ciudad, principalmente en la Avenida de las Américas y Circunvalación Sur. Además, se ubican varias electrolineras cerca del Centro Histórico y Control Sur, por ser zonas de tráfico vehicular mayoritario. La pérdida de potencia activa es más estable cuando se ejecuta el algoritmo con 10 ECVE, caso contrario sucede cuando el número de estaciones a construir es 4, como se observa en la Figura 5.



Figura 5: Pérdida de potencia activa en función de n

El flujo vehicular capturado es directamente proporcional a las electrolineras instaladas. Cuando se construyen 8 estaciones de carga, el flujo capturado es aproximadamente 88.000 y las pérdidas de potencia oscilan entre los 510 a 480 kW. Sin embargo, el algoritmo no converge al intentar instalar más de 15 ECVE, debido a las restricciones que consideran a los centroides como los orígenes/destinos entre zonas.

Tabla 3: Ubicación de 8 ECVE en el SEP

Código Subestación	Cantidad ECVE	Magnitud Voltaje (p.u.)
Luis Cordero	1	0.9560
P. Industrial	1	0.9739
El Arenal	3	0.9553
Turi	1	0.9646
Monay	2	0.9974

Por otro lado, la magnitud del voltaje en las barras para cada caso de estudio (Figura 6) varía significativamente al aumentar o disminuir la cantidad de ECVE. Cabe resaltar, la mínima variación del voltaje en las barras 1 y 2, las cuales, están relacionadas con la entrada de los transformadores de potencia en las subestaciones S/E 01 y S/E 02 respectivamente.



Figura 6: Magnitud de voltaje en cada barra para cantidades diferentes de ECVE construidas.

Debido a la penetración de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca, se decide instalar 8 ECVE en la simulación. El algoritmo ϵ -restringido se ejecuta iterativamente 100 veces, buscando maximizar la función objetivo FO_f y, a la par, minimizar las pérdidas de potencia activa representadas por la función objetivo FO_p . El resultado de este proceso, entrega cien posibles soluciones al problema -las que se observan en la Figura 7. Luego, al desarrollar el método minimax en este frente de Pareto, se encuentra la solución óptima maximizando los requisitos mínimos de diseño.

Número	Subestación	Magnitud	Ángulo
Barra	Relacionada	Voltaje (p.u.)	Voltaje (rad)
1	S/E 01	0.9560	-0.0853
2	S/E 02	0.9503	-0.0357
3	S/E 03	0.9970	0.0921
4	S/E 04	0.9931	0.0264
5	S/E 05	0.9684	0.0111
6	S/E 06	1.0000	0.0000
7	S/E 07	1.0065	0.0737
8	S/E 08	0.9746	0.0470
9	S/E 04	0.9739	-0.0581
10	S/E 06	0.9918	-0.0457
11	S/E 05	0.9553	-0.0827
12	S/E 08	0.9646	-0.0096
13	S/E 03	0.9974	-0.0008
14	S/E 07	0.9775	0.0531
15	S/E Cuenca	1.0373	0.1414
16	S/E 01	0.9560	-0.0853
17	S/E 02	0.9554	-0.0233
	,		



Figura 7: Frente o dominancia de Pareto

El resultado final del algoritmo, permite capturar el 11.97 % de flujo de tráfico vehicular y minimizar las pérdidas de potencia activa del sistema hasta los 501,82 kW. Además, en la Tabla 4 se observan los valores determinados por el algoritmo para la magnitud y ángulo de voltaje para cada barra del SEP.

Por añadidura, la solución óptima del problema, viene acompañada de las ubicaciones ideales de las electrolineras. Cabe resaltar en este punto, que para la determinación de las ubicaciones de las ECVE se deben cumplir las siguientes condiciones:

- La distancia entre el nodo elegido y el transformador más cercano debe ser ≤ 250 m.
- El transformador designado debe tener la capacidad mínima de 200 kVA y porcentaje de cargabilidad ≤ 25 %.
- Se permite una electrolinera por alimentador, por tal motivo, se instalarán máximo 4 ECVE por subestación, debido a que la cantidad mínima de alimentadores que posee cada subestación en particular entre todas las subestaciones es 4.

Tabla 4: Magnitud y ángulo de voltaje en las barras.

Tomando en consideración los requisitos del problema, el conjunto de transformadores disponibles en la red eléctrica se reduce a 311. Por la naturaleza aislada entre las redes eléctricas y de tráfico vehicular, se debe incluir una ecuación que las interrelacione. Matemáticamente esta ecuación se describe en (10), en donde: se suman todos los nodos x_k capaces de ser alimentados por un transformador cualquiera del sistema, además, se asume que la estación de carga $ECVE_p$ se instalará en la ubicación de este transformador.

$$\sum_{k}^{TXNO} x_k = \sum_{p}^{LOAD} ECVE_p \quad \forall n \in N$$
 (10)

La Tabla 3 presenta las ubicaciones óptimas para 8 estaciones de carga para vehículos eléctricos, las cuales, se distribuyen en mayor medida sobre las subestaciones con alta capacidad y baja demanda de potencia y, además, que se ajustan a las restricciones eléctricas del problema; transformadores con una potencia igual o superior a 200 kVA. Alternativamente, se puede tomar en consideración construir las electrolineras en donde se encuentran ubicados los transformadores, esta contemplación tiende a reducir las pérdidas de potencia activa en la red de distribución como se demuestra en [4].

Para finalizar, la Figura 8 presenta la cartografía de la ciudad de Cuenca con los transformadores de la red eléctrica y los nodos vehiculares superpuestos, también, se ubican las 8 estaciones de carga para vehículos eléctricos. Es fácil advertir, que las ubicaciones de las estaciones tienden a formarse en la periferia del centro de la ciudad, esto, porque es la zona con mayor cantidad de O/D de tráfico vehicular. Conviene señalar en este momento, la importancia de la ecuación 10, un ejemplo permitirá entenderlo de una manera más clara: Suponga que se optimizan ambas funciones objetivos simultáneamente y el resultado nos invita a instalar tres ECVE en la barra 1, dos en la barra 3, y tres en la barra 11. Suponiendo que la barra 1 únicamente posee dos transformadores disponibles.¿Qué sucederá con la estación excedente?, ¿se instalarán las estaciones si los transformadores se encuentran a una distancia prolongada de las ubicaciones propuestas?. Y de modo semejante en los demás casos.

4. Discusión

En la presente investigación se optimizan simultáneamente los flujos vehiculares capturados y las pérdidas de potencia activa, sin embargo, tal como en [17], se podría incluir a los costos de instalación de la electrolinera como tercera variable al problema. En este contexto, la optimización multiobjetivo nos proporciona como resultados, un 11.97 % de flujos capturados y 501,82 kW de pérdidas de potencia activa, estos valores coinciden con los obtenidos en [15], aunque las investigaciones difieran en el tamaño de la población del caso de estudio.

Por otro lado, en nuestro estudio, el algoritmo ϵ restringido tiende a no converger cuando la penetración de electrolineras es alta, situación contraria se da en [29], en donde utilizan algoritmos evolutivos (PSO) con grandes poblaciones para resolver escenarios con altas demandas de ECVE.

Ahora bien, dividir en zonas la red vehicular y estimar un solo sentido en las carreteras, reduce la complejidad de nuestro problema, en este sentido, nos inspiramos en [13] para esta apreciación, además, asumimos la no posibilidad de giros y, la prohibición de ciertas zonas para la construcción de estaciones. Más aún, la información de orígenes/destinos (O/D) que obtuvimos a través de encuestas, nos permite cuantificar los flujos. En este marco, el método de contar los flujos difiere entre la mayoría de las investigaciones, aunque es muy particular el utilizado en [10], en donde se integra al GPS en un grupo de vehículos, monitoreando así su desplazamiento.

Cabe mencionar, que el porcentaje de tráfico capturado por el algoritmo hace referencia a la cantidad de 88.600 flujos vehiculares, en el cual, no se discrimina a los vehículos que únicamente utilizan electricidad para movilizarse, sino que es todo el universo de vehículos el que genera ese flujo. El motivo de esta consideración, es la falta de información sobre la penetración de vehículos eléctricos en la ciudad. Otra posible solución se realiza en [13], en donde, se obtienen buenos resultados considerando períodos de carga y distancias máximas de viajes.

Se asume la instalación de cargadores ultra-rápidos (ver Tabla 1), esto satisface al cliente y reduce la ansiedad del conductor, sin embargo, se podrían instalar varios tipos de cargadores como en [9], por ejemplo ubicar ECVE de menor potencia en sitios específicos, como restaurantes y centros comerciales. No obstante, estos no aportarán a la cantidad de flujo capturado, únicamente satisfará las necesidades del cliente.

5. Conclusiones

La ubicación óptima de estaciones de carga para vehículos eléctricos propone un gran desafío para el planificador de la red, en la medida en que ésta se realiza de manera correcta la penetración de vehículos eléctricos aumentará. Por este motivo, se desarrolla en la presente investigación un modelo de planificación multiobjetivo, el cual, es capaz de minimizar las pérdidas de potencia activa y maximizar el flujo de tráfico vehicular capturado. Para este fin, el FCLM permite maximizar los flujos y, la estrategia OPF minimiza las pérdidas de potencia en la red de subtransmisión. Luego, el criterio de toma de decisiones minimax permite determinar la solución óptima de la frontera de Pareto. El caso de estudio se desarrolla en una ciudad relativamente pequeña y con una baja penetración de vehículos eléctricos, sin embar-



Figura 8: Ubicación óptima de 8 ECVE en la ciudad de Cuenca

go, por la cantidad de nodos elegibles de la red vehicular, el problema tiende a complicarse. Por esta razón, al escoger los nodos centrales de las zonas de tráfico como O/D de flujo vehicular, se logra resolver el problema fácilmente. Además, se discriminan a los nodos que se encuentran apartados de un transformador capaz de alimentar a la ECVE. Por este motivo, el flujo vehicular es mayoritariamente afectado por la ubicación de las electrolineras. Adicionalmente, la cantidad de flujo vehicular capturado tiene una relación en proporción directa con la cantidad de estaciones a construir. Por el contrario, las pérdidas de potencia activa se mantienen dentro de cierto rango, indiferentemente del aumento o disminución de estaciones de carga en la red. El método ϵ -restringido, presenta inconvenientes de convergencia cuando la cantidad de electrolineras que se deben instalar es superior a 15. Por este motivo, para resolver problemas con demandas de estaciones muy grandes, se recomienda el algoritmo evolutivo NSGA-II o PSO si se prefieren las estrategias heurísticas. Sin embargo, el algoritmo ϵ -restringido es ideal por su simplicidad en las redes con baja demanda de electrolineras, como en el presente caso de estudio. Además, se recomienda para trabajos futuros, considerar el doble sentido de tráfico vehicular, esto permitirá apegarse mucho más a un entorno de simulación real.

Referencias

- M. Z. Zeb, E. al., Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in the Active Distribution Network, IEEE Access 8 (2020) 68124–68134. doi:10.1109/ACCESS.2020.2984127.
- [2] D. Efthymiou, K. Chrysostomou, M. et al. Morfoulaki, Electric vehicles charging infrastructure location: a genetic algorithm approach, European Transport Research Review 9 (2) (2017). doi:10.1007/s12544-017-0239-7.
- [3] R. C. Leou, C. L. Su, C. N. Lu, Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network, IEEE Transactions on Power Systems 29 (3) (2014) 1055–1063. doi:10.1109/TPWRS.2013.2291556.
- [4] M. Spitzer, J. Schlund, E. Apostolaki-Iosifidou, M. Pruckner, Optimized integration of electric vehicles in low voltage distribution grids, Energies 12 (21) (2019) 1–19. doi:10.3390/en12214059.

- [5] A. Ul-Haq, M. Azhar, Y. Mahmoud, A. Perwaiz, E. A. Al-Ammar, Probabilistic modeling of electric vehicle charging pattern associated with residential load for voltage unbalance assessment, Energies 10 (9) (2017) 1–18. doi:10.3390/en10091351.
- [6] S. Deb, E. al, Impact of electric vehicle charging station load on distribution network, Energies 11 (1) (2018) 1-25. doi:10.3390/en11010178.
- [7] T. Gnann, S. Funke, N. Jakobsson, P. Plötz, F. Sprei, A. Bennehag, Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs, Transportation Research Part D: Transport and Environment 62 (2018) 314–329. doi:10.1016/j.trd.2018.03.004.
- [8] M. Campaña, E. Inga, Despliegue óptimo georreferenciado de estaciones de carga vehicular pública considerando capacidad de flujo y distancias máximas habilitantes, I+D Tecnológico 15 (2) (2019) 68–78. doi:10.33412/ idt.v15.2.2248.
- [9] Y. Zhang, E. al, GIS-Based Multi-Objective Particle Swarm Optimization of charging stations for electric vehicles, Energy 169 (2019) 844-853. doi:10.1016/j.energy.2018.12.062.
- [10] M. M. Vazifeh, E. al., Optimizing the deployment of electric vehicle charging stations using pervasive mobility data, Transportation Research Part A: Policy and Practice 121 (January 2017) (2019) 75-91. arXiv:1511. 00615, doi:10.1016/j.tra.2019.01.002.
- [11] M. S. K. Reddy, K. Selvajyothi, Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in Radial Distribution System along with Reconfiguration, 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing, ICESIP 2019 (2019) 1–6doi:10.1109/ICESIP46348.2019.8938164.
- [12] A. Awasthi, K. Venkitusamy, S. Padmanaban, R. Selvamuthukumaran, F. Blaabjerg, A. K. Singh, Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm, Energy 133 (2017) 70–78. doi:10.1016/j.energy.2017.05.094.
- [13] G. Liu, E. al., Charging station and power network planning for integrated electric vehicles (EVs), Energies 12 (13) (2019) 1–22. doi:10.3390/en12132595.
- [14] X. Wang, E. al., Coordinated Planning Strategy for Electric Vehicle Charging Stations and Coupled Traffic-Electric Networks, IEEE Transactions on Power Systems 34 (1) (2019) 268-279. doi:10.1109/TPWRS.2018. 2867176.
- [15] F. Wu, R. Sioshansi, A stochastic flow-capturing model to optimize the location of fast-charging stations with uncertain electric vehicle flows, Transportation Research Part D: Transport and Environment 53 (2017) 354–376. doi:10.1016/j.trd.2017.04.035.
- [16] G. Battapothula, C. Yammani, S. Maheswarapu, Multi-objective simultaneous optimal planning of electrical vehicle fast charging stations and DGs in distribution system, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy 7 (4) (2019) 923–934. doi:10.1007/s40565-018-0493-2.
- [17] Y. Xiang, E. al., Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates, Applied Energy 178 (2016) 647–659. doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.021.
- [18] B. Wang, E. al., Electrical Safety Considerations in Large-Scale Electric Vehicle Charging Stations, IEEE Transactions on Industry Applications 55 (6) (2019) 6603-6612. doi:10.1109/TIA.2019.2936474.
- [19] X. Ren, E. al., Location of electric vehicle charging stations: A perspective using the grey decision-making model, Energy 173 (2019) 548-553. doi:10.1016/j.energy.2019.02.015.
- [20] S. Faddel, A. T. Elsayed, O. A. Mohammed, Bilayer Multi-Objective Optimal Allocation and Sizing of Electric Vehicle Parking Garage, IEEE Transactions on Industry Applications 54 (3) (2018) 1992–2001. doi:10.1109/ TIA.2018.2803151.
- [21] V. H. Fan, Z. Dong, K. Meng, Integrated distribution expansion planning considering stochastic renewable energy resources and electric vehicles, Applied Energy 278 (August) (2020) 115720. doi:10.1016/j.apenergy. 2020.115720.

- [22] I. Safak Bayram, S. Bayhan, Location Analysis of Electric Vehicle Charging Stations for Maximum Capacity and Coverage, Proceedings - 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2020 (2020) 409–414doi:10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161639.
- [23] Z. J. M. Shen, B. Feng, C. Mao, L. Ran, Optimization models for electric vehicle service operations: A literature review, Transportation Research Part B: Methodological 128 (2019) (2019) 462–477. doi:10.1016/j.trb. 2019.08.006.
- [24] J. Zhu, Optimization of Power System Operation, Vol. 4, John Wiley & Sons, 2016.
- [25] A. F. Porras-Ortiz, J. Layedra, H. Arcos, Active power loss minimization in the Santa Cruz and Baltra hybrid energy system using particle swarm optimization, 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015 (2016) 429–434doi:10.1109/ISGT-LA.2015.7381193.
- [26] K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, Modern Heuristic Optimization Techniques, Vol. 4, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2008.
- [27] P. Pardalos, A. Žilinskas, J. Žilinskas, Non-Convex Multi-Objective Optimization, 123rd Edition, Springer International, Cham, 2017.
- [28] H. Saber, M. Moeini-Aghtaie, M. Ehsan, Developing a multi-objective framework for expansion planning studies of distributed energy storage systems (DESSs), Energy 157 (2018) 1079–1089. doi:10.1016/j.energy.2018. 06.081.
- [29] N. Tabrizi, E. Babaei, M. Mehdinejad, An interactive fuzzy satisfying method based on particle swarm optimization for multi-objective function in reactive power market, Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering 12 (1) (2016) 65–72. doi:10.22068/IJEEE.12.1.65.
- [30] M. Masoud, H. A. Khalifa, S. Q. Liu, M. Elhenawy, P. Wu, A fuzzy goal programming approach for solving fuzzy multi-objective stochastic linear programming problem, Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2019 (2019) 1–6doi:10.1109/IESM45758.2019. 8948204.
- [31] Marlon René Martínez Rodas, Carlos Gustavo Morocho Ortiz, Diagnóstico del sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur frente al impacto masivo de las cocinas de inducción, Ph.D. thesis (2014).