

Ubicación óptima para recarga de vehículos eléctricos en una red de media tensión.

Optimal location for recharging electric vehicles on a medium voltage network.

Marlon Julián Silva-Rodríguez¹, Fernan Adolfo Vega-Torres², Javier Enrique Solano-Martínez³

^{1,2,3}Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga - Colombia

ORCID: ¹[0000-0002-3718-5550](https://orcid.org/0000-0002-3718-5550), ²[0000-0003-4019-1430](https://orcid.org/0000-0003-4019-1430), ³[0000-0002-6782-5547](https://orcid.org/0000-0002-6782-5547)

Recibido: 19 de septiembre de 2021.

Aceptado: 15 de diciembre de 2021.

Publicado: 01 de enero de 2022.

Resumen- En este trabajo, se presenta una metodología para la ubicación óptima de estaciones de recarga utilizando cosimulación. El sistema eléctrico se modela en DigSILENT PowerFactory. El algoritmo de optimización se implementa en Matlab. El desafío de este problema es definir una pasarela que permita comunicar Matlab con DigSILENT PowerFactory. Se utiliza Matlab para desarrollar el algoritmo de Ubicación Óptima de Estaciones de Recarga (UOER), pues cuenta con excelentes herramientas que permiten hacer análisis de los datos y desarrollo de algoritmos. La red se implementa en DigSILENT PowerFactory por su excelente análisis en simulaciones de sistemas eléctricos. El algoritmo propuesto, es un algoritmo híbrido conformado por dos criterios donde el primero es el método de búsqueda exhaustiva, el cual evalúa todas las posibles soluciones y escoge la mejor solución entre todas, por otra parte, el segundo criterio se basa en el elitismo, el cual consiste en seleccionar las mejores soluciones, y trasladarlas a la siguiente generación sin ninguna alteración. El algoritmo desarrollado, es un algoritmo heurístico el cual no garantiza que se va a encontrar el óptimo de la solución; sin embargo, se muestra que para casos de estudio el sistema permite encontrar la solución óptima. Con este trabajo, se permitirá en un futuro brindar servicios a cualquier operador de red o entidad que tenga un sistema de distribución, y encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga.

Palabras clave: vehículo eléctrico, co-simulación, algoritmo genético, optimización.

Abstract— In this paper, a methodology for optimal placement of charging stations using cosimulation is presented. The electrical system is modeled in DigSILENT PowerFactory. The optimization algorithm is implemented in Matlab. The challenge of this problem is to define a gateway to communicate Matlab with DigSILENT PowerFactory. Matlab is used to develop the Optimal Location of Recharging Stations (UOER) algorithm, since it has excellent tools that allow data analysis and algorithm development. The network is implemented in DigSILENT PowerFactory for its excellent analysis in power system simulations. The proposed algorithm is a hybrid algorithm consisting of two criteria where the first is the exhaustive search method, which evaluates all possible solutions and chooses the best solution among all, on the other hand, the second criterion is based on elitism, which is to select the best solutions, and move them to the next generation without any alteration. The algorithm developed is a heuristic algorithm which does not guarantee that the optimal solution will be found; however, it is shown that for study cases the system allows finding the optimal solution. With this work, it will be possible in the future to provide services to any network operator or entity that has a distribution system, and to find the optimal location of recharging stations.

Keywords: electric vehicle, co-simulation, genetic algorithm, optimization.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: juliansilva_95@hotmail.com (Marlon Julián Silva Rodríguez).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: M. J. Silva-Rodríguez, F. A. Vega-Torres y J. E. Solano-Martínez, "Ubicación óptima para recarga de vehículos eléctricos en una red de media tensión", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 10, no. 1, pp. 75-84, 2021, doi: [10.15649/2346030X.2713](https://doi.org/10.15649/2346030X.2713)

I. INTRODUCCIÓN

Los vehículos híbridos y eléctricos son considerados como una posible solución para reducir las emisiones contaminantes en el planeta. La masificación de estos vehículos requiere que se desarrollen estaciones de recarga en los centros urbanos y en las residencias de los usuarios. Este trabajo tiene como objetivo proponer un algoritmo que permita encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en redes de distribución de energía eléctrica.

Trabajos previos en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicación (E3T) de la Universidad Industrial de Santander han tratado de resolver este problema. Uno de estos es el trabajo desarrollado en el año 2018 por Ardila y Ochoa [1], quienes implementaron un algoritmo genético para encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga. Este trabajo fue desarrollado únicamente en Matlab. Sin embargo, los operadores de red utilizan software para modelar sistemas de distribución, el más usado en la industria colombiana es DigSILENT PowerFactory.

En este trabajo, se busca desarrollar una herramienta para la ubicación óptima de estaciones de recarga utilizando DigSILENT PowerFactory. El algoritmo de optimización se implementa en Matlab. El desafío de este problema es definir una pasarela que permita comunicar Matlab con DigSILENT PowerFactory.

Se utiliza Matlab para desarrollar el algoritmo de Ubicación Óptima de Estaciones de Recarga (UOER), pues cuenta con excelentes herramientas que permiten hacer análisis de los datos y desarrollo de algoritmos. La red se implementará en DigSILENT PowerFactory por su excelente análisis en simulaciones de sistemas eléctricos. Con este trabajo, se permitirá en un futuro brindar servicios a cualquier operador de red o entidad que tenga un sistema de distribución, y encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga.

II. MARCO TEÓRICO

Los vehículos eléctricos son particularmente interesantes debido a sus bajas emisiones. Se espera que, este tipo de vehículos sustituya gradualmente a los que funcionan con combustibles fósiles. Este cambio no solo disminuiría la contaminación, sino que aliviaría las preocupaciones de seguridad relacionadas con la extracción, importación y combustión del petróleo [2-4]. Algunos otros beneficios como la menor contaminación acústica, el bajo requisito de mantenimiento, la rentabilidad, su posible uso como recurso energético renovable, entre otros, son distintivos de este tipo de tecnología [5-6]. Debido a esto, el número de VE está aumentando rápidamente, lo que hace que los costes de esta tecnología sean más competitivos [7].

El auge de los vehículos eléctricos, ha hecho que la demanda aumente en las redes de distribución. Estas redes están dimensionadas para suplir la demanda de los usuarios. Los vehículos eléctricos vistos desde la red, son semejantes a una batería. Estos vehículos eléctricos tienen diferentes tipos de carga, tal y como se muestra en la figura 1.

	BÁSICA	SEMI-RÁPIDA	RÁPIDA	SUPER-RÁPIDA
Potencia	2,3 - 7,4 kW Carga monofásica	22 kW Carga trifásica	40 - 50 kW Carga trifásica / continua	100 - 150 kW Carga en continua
Tiempo medio de recarga	2,6 h - 48 min	16 min	9 - 7,2 min	3,6 - 2,4 min
Tiempo de recarga larga	14 - 4,3 horas	1,5 horas	48 - 38 min	19,2 - 12,8 min
Costo del sistema	500 - 1.500 €	A partir de 2.500 €	20.000-30.000 €	Mas de 100.000 €

Figura 1: Tipos de carga de vehículos eléctricos.

Fuente: Guía de movilidad eléctrica para las entidades locales, 2019, p. 16 [8].

Las bajas emisiones, la comodidad de la carga y una alta eficiencia de más del 56% se consideran ventajas de los vehículos eléctricos (VE), cuyo mercado está creciendo exponencialmente y se esperaba que fuera de más 20 millones de vehículos en 2021 [9-10]. Sin embargo, la inexistencia o incluso un número limitado de estaciones de recarga de vehículos eléctricos generan una pérdida de interés en los usuarios por adquirir VE [2]. Además, abordar el rápido crecimiento de los VE requiere una cuidadosa planificación para la ubicación de las estaciones de recarga, evitando escenarios como problemas de calidad de la energía o la saturación de la capacidad de la red existente. Es por ello que se hace necesario conocer técnicas para encontrar lugares óptimos para las estaciones de recarga.

La conexión de los vehículos eléctricos a la red, también puede ser gestionado mediante escenarios de demanda, sea del sector comercial o del sector residencial, estas demandas se representan en las figuras 2 y 3. Los valles en las curvas de las demandas diarias, son la solución para la conexión de los vehículos según los resultados obtenidos por Rangel y Jaimes en el año 2017, en la Universidad Industrial de Santander quienes usaron el software DigSILENT PowerFactory para adelantar el diagnóstico a la red simulada [11].

La ubicación óptima de estaciones de recarga en un sistema de distribución suele resolverse minimizando costes, como las inversiones, la operación y el mantenimiento de las estaciones, los costes de las pérdidas de energía en la red, las pérdidas de energía [12-14]. Asimismo, la incertidumbre en la penetración del VE y la variación de los precios de la energía eléctrica pueden integrarse en la formulación del problema [15]. Podrían considerarse las restricciones técnicas relacionadas con el funcionamiento de la red de distribución, así como las restricciones financieras y urbanísticas.

Los Algoritmos Genéticos (AG) son un método frecuentemente utilizado para resolver problemas de optimización de localización de estaciones de recarga. Dada una función objetivo, el algoritmo comienza con un conjunto inicial de soluciones aleatorias llamado población inicial, y tras varias iteraciones sucesivas, el algoritmo converge en el mejor individuo que representa la solución óptima del problema de optimización [16-17].

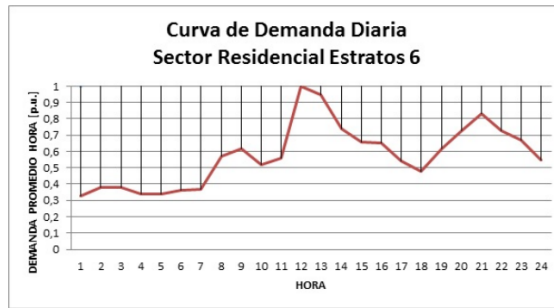


Figura 2: Curva de demanda diaria sector residencial estrato 6. Fuente: Electrificadora de Santander Grupo EPM.



Figura 3: Curva de demanda diaria sector comercial. Fuente: Electrificadora de Santander Grupo EPM.

La co-simulación nos ayuda a acoplar los simuladores de flujo de energía y los entornos de tiempo de ejecución, lo que permite sustituir las simulaciones computacionalmente costosas, convirtiendo la ubicación óptima de las estaciones de carga de vehículos eléctricos en un problema más rápido y fácil de resolver [18].

a. Cosimulación

Las cosimulaciones se implementan para que dos programas de forma separada den solución a un mismo objetivo como ilustrado en las figuras 4, 5 y 6. El problema de ubicación óptima de estaciones mediante cosimulación Python-PowerFactory se estudia en diferentes trabajos. Las variables eléctricas en la red de distribución se obtienen a partir de PowerFactory porque es un programa versátil en el que se pueden modelar las redes de distribución, y tiene algunas otras ventajas como la simulación de soluciones de redes inteligentes, especialmente si hay muchos recursos distribuidos como EV [19]. Uno de sus principales puntos fuertes es la interacción con otras API de software matemático como Python o MATLAB [20-25].

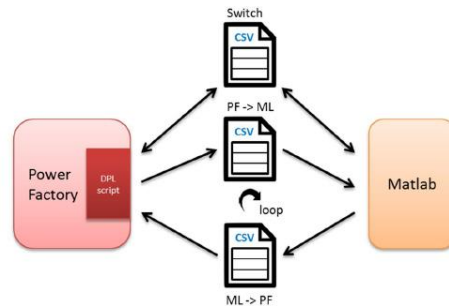


Figura 4: Comunicación DigSILENT PowerFactory y Matlab. Fuente: Latif, Shahzad, Palensky & Gawlik, 2015, p. 487 [20].

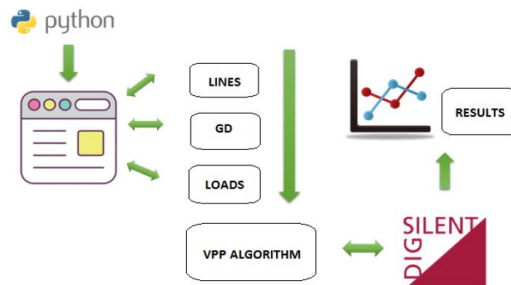


Figura 5: Comunicación DigSILENT PowerFactory y Python. Fuente: Medina, Avella & Rivas, 2018, p. 14931 [6].

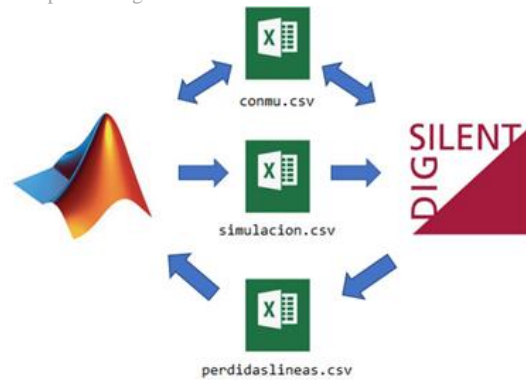


Fig. 6. Comunicación DigSILENT PowerFactory y Python.
Fuente: Elaboración propia.

b. Comunicación Propuesta Matlab-DigSILENT

El propósito de usar estos programas juntos, es asociar las ventajas de ambas plataformas para resolver problemas del sistema de una manera más práctica. DigSILENT PowerFactory cuenta con dos tipos de lenguaje para la programación, uno es el lenguaje DPL y el otro que se presenta es el lenguaje de programación de código abierto Python. DPL, es el lenguaje central donde se puede interactuar con los objetos/elementos internos del modelo por medio de funciones, modificando parámetros y variables para luego generar resultados.

Los objetos de los comandos DPL se pueden dividir en:

- Comandos raíz, que tienen sus propios scripts en la página Script del cuadro de diálogo.
- Comandos de referencia, que utilizan los scripts de comandos remotos DPL adaptando solo parámetros de entrada, salida y objetos externos.

Esta información de entrada, se puede evaluar utilizando funciones y variables internas dentro del script. También se pueden usar y ejecutar objetos internos. De esta forma, la comunicación entre DigSILENT PowerFactory y Matlab se hace por medio del comando DPL

En la Figura 6, se muestra el procedimiento de comunicación para el caso de estudio de este trabajo. Para la elaboración del código automático de datos, se escribe una parte en Matlab y la otra en el lenguaje de programación DigSILENT (DPL) a través de un script.

El intercambio de los datos se realiza utilizando tres archivos .csv: uno para transferir el valor de las cargas de Matlab a DigSilent, el siguiente para transferir los datos obtenidos de DigSilent a Matlab y finalmente la comunicación lectura/escritura entre los dos softwares.

El archivo que permite la comunicación actúa como un interruptor que toma los valores 0 y 1. Si el valor del archivo de comunicación es 0, DigSilent lee el archivo que contiene los datos de las cargas, ejecuta comunicación Matlab-DigSilent y escribe el archivo que contiene la información necesaria exportada por DigSilent y Matlab espera. Por otro lado, si el valor del archivo de comunicación es 1, Matlab lee el archivo que contiene la información exportada por DigSilent, ejecuta un script en Matlab y escribe en el archivo que contiene los datos de las cargas y DigSilent espera.

Durante este procedimiento, ambos programas escanean y cambian el valor del archivo de comunicación después de que cada uno de ellos termina su trabajo.

III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

Se propone un algoritmo híbrido para encontrar la ubicación cuasióptima de k estaciones de recarga en un sistema de n barras. La solución a este problema, si se considera que una barra puede alojar las k estaciones, tiene nk soluciones, h es el número de soluciones posibles en donde no se permite una estación de recarga en el mismo nodo:

$$h = \prod_{i=0}^{k-1} n - i \quad (1)$$

Este problema puede tener un número alto de soluciones. Por ejemplo, para el sistema propuesto en [11], de 33 barras para instalar k estaciones se tendrían una cantidad de soluciones presentada en la figura 7.

Cantidad de estaciones a ubicar	Permitiendo varias estaciones por nodo	Restringiendo una estación por nodo
1	33	33
2	1089	1056
3	35937	32736

Figura 7: Numero de soluciones según la cantidad de estaciones.
Fuente: Elaboración propia.

a. Algoritmo propuesto

En esta sección se presentará un método, que en lugar de evaluar n^k soluciones, evalúa únicamente m soluciones, donde m se define de la siguiente manera:

$$m = \sum_{i=0}^{k-1} n - i \quad (2)$$

Tomando las dos mejores soluciones por iteración se tendrán l soluciones, donde:

$$l = n + 2(n - 1) + 2(n - 2) + \dots + 2(n - k)$$

Esta solución es cuasióptima, ya que no se puede garantizar el óptimo de la solución; sin embargo, se quiere mostrar mediante un caso de estudio que se puede estar muy cerca a la solución, o en la solución óptima.

En el algoritmo propuesto se va a calcular la ubicación de una única estación en cada iteración; por tal motivo, se tienen tantas iteraciones como estaciones de recargas que se queran ubicar. La figura 6, representa el diagrama de flujo del algoritmo que se propone.

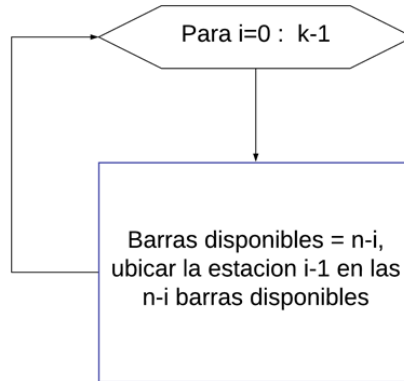


Figura 8: Diagrama de flujo simplificado del algoritmo propuesto.
Fuente: Elaboración propia.

Para encontrar la ubicación de la primera estación, se evalúa la función objetivo cuando se ubica la estación en las n posibles barras, la solución óptima muestra la ubicación de la primera estación. Si no se permiten varias estaciones en la misma barra en la iteración i , tendremos $n-i$ posibles barra disponible. Finalmente, se realiza una búsqueda en todas estas posibles barras, asumiendo que las estaciones que ya han sido identificadas se encuentran presentes como cargas en el sistema.

El algoritmo propuesto, es un algoritmo híbrido conformado por dos criterios donde el primero es el método de búsqueda exhaustiva, el cual evalúa todas las posibles soluciones y escoge la mejor solución entre todas, por otra parte, el segundo criterio se basa en el elitismo, el cual consiste en seleccionar las mejores soluciones, y trasladarlas a la siguiente generación sin ninguna alteración, garantizando que el algoritmo heurístico no reducirá su calidad de generación.

b. Funcionamiento del algoritmo

Para encontrar la ubicación de la primera estación de recarga ($i=1$), se corren n flujos de potencia ubicando la estación en cada una de las n barras disponibles. Esta estación se ubicará en la barra que minimice las pérdidas en el sistema. Además, cuando se va a encontrar la ubicación de la i -ésima estación de recarga ($k=i$), se corren $n-i+1$ flujos de potencia ubicando la estación en cada una de las $n-i+1$ barras disponibles y finalmente la estación se ubicará en la barra que minimice las pérdidas en el sistema.

En la primera iteración, se tendrán n barras disponibles, en las cuales se evalúa la ubicación de la estación de recarga en todas las n barras y se determina cuál es la mejor, dependiendo de cuál es la función objetivo definida. Las siguientes iteraciones, donde ya se han ubicado estas estaciones, las barras no se encuentran disponibles, por ejemplo, para un sistema de 9 barras, se busca encontrar la ubicación para 2 estaciones de recarga, las soluciones posibles serían 72. Sin embargo, con este algoritmo solo se tendrían 2 iteraciones.

Si se quiere obtener la ubicación óptima de la primera estación, esta se ubica hipotéticamente en la barra 6. De modo que, para la segunda iteración se buscaría ubicar la segunda estación en las barras disponibles (b1 b2 b3 b4 b5 b7 b8 b9).

En la figura 7 se ilustra la solución del ejemplo presentado, considerando que la ubicación se encontraría en las barras 6 y 9.

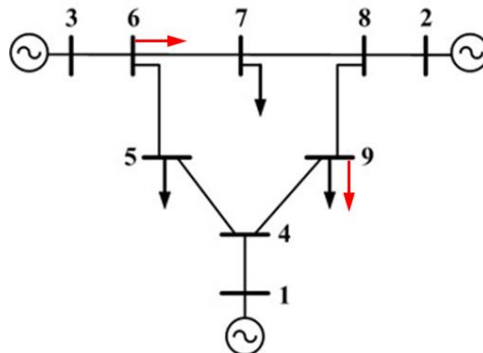


Figura 9: Ubicación de la segunda estación, con la primera ya fijada.
Fuente: Elaboración propia.

c. Desventajas del algoritmo

El algoritmo desarrollado en este trabajo, es un algoritmo heurístico el cual no garantiza que se va a encontrar el óptimo de la solución; sin embargo, en las siguientes secciones se analizara en una red de distribución, si el algoritmo permite encontrar la solución óptima o qué tan lejos se encuentra del óptimo.

IV. SISTEMA DE RED IMPLEMENTADO

En esta sección, se presentará el Sistema de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE) presentado en el trabajo realizado por Ardila y Ochoa en el año 2018. El anexo presenta la información eléctrica que describe el sistema. En la Figura 10, se observa la topología del sistema.

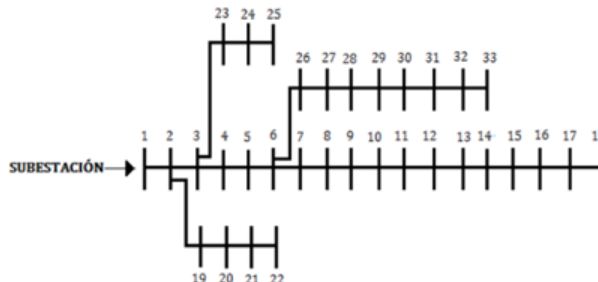


Fig. 10. Diagrama unifilar de la red de media tensión
Fuente: trabajo de grado de Ardila y Ochoa, 2018, p32 [1]

a. Función Objetivo

La función objetivo está definida por dos modelos de ecuación (3) y (4):

$$P_{ti} = \sum P_b + \sum (S_i) * P_{ER} \tag{3}$$

La ecuación 3, indica la suma de potencias en el sistema para cada iteración, conformada por dos partes:

La primera, consiste en la suma de potencia en las barras de todo el sistema, sin la estación de recarga. La segunda, en la suma de potencia de la carga, representada por la estación de recarga, S_i es la ubicación seleccionada por el algoritmo y P_{ER} es la carga establecida para la estación de recarga.

$$\min P_{ti} = \min [P_{ti1}, P_{ti2}, P_{ti3}, \dots, P_{tmi}] \tag{5}$$

$$P_{tmi} = [P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} + \dots + P_{im}] \tag{6}$$

La ecuación 5, después de haber corrido el flujo de potencia, selecciona el valor mínimo de las pérdidas en las líneas, con la estación de recarga ubicada en cada una de las barras. Donde P_{ti} son las pérdidas en las m líneas totales de cada iteración, ver ecuación 6.

En este ejemplo, representado en la ecuación 7, se puede observar una solución para la ubicación de la estación de recarga en la barra 5, donde b es el número de barras del sistema.

$$S_i = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots]_{1 \times b} \tag{7}$$

b. Restricciones

La ecuación 8, nos indica la penalización del sistema, la tensión no puede pasar un 5 % por arriba o por abajo en ninguna de las barras del sistema.

$$V_{min} \leq V_b \leq V_{max} \quad \forall b \in N \tag{8}$$

V. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos al dar solución a los diferentes escenarios planteados. Los resultados muestran la ubicación de la Estación de Recarga de Vehículos Eléctricos (ERV).

Para corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo, en el primer escenario se presentan los resultados al ubicar una ERV teniendo en cuenta las pérdidas de potencia. Se encuentra la solución mediante el método de búsqueda exhaustiva y elitismo, en el cual se evalúa cada solución posible en la función objetivo.

En las Tablas 1, 2 y 3 se muestran los resultados al elegir solo un individuo como el mejor. Como se puede observar en la tabla 1, el resultado es el esperado, ya que la ERV quedó ubicada en la primera barra, la cual es la más cercana a la subestación y por ende las pérdidas son las menores. Para evitar que la ERV quede ubicada en el mismo nodo, se hace necesario aplicar el criterio del algoritmo junto con las restricciones del modelo matemático. En el caso de dos y tres, como se representa en las tablas 2 y 3.

Tabla 1: Ubicación de la primera estación de recarga.

Fuente: Elaboración propia.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	17	227.7560
1	220.0936	18	227.8263
2	220.3075	19	220.3426
3	221.3417	20	220.5905
4	221.8996	21	220.6376
5	222.4608	22	220.6830
6	223.6831	23	221.6021
7	223.9973	24	222.0790
8	225.1606	25	222.3268
9	225.7233	26	224.1396
10	226.2540	27	224.3274
11	226.3431	28	225.0059
12	226.5002	29	225.4939
13	227.0722	30	225.7491
14	227.2663	31	226.1044
15	227.4128	32	226.1810
16	227.5589	33	226.2055

Tabla 2: Ubicación de la segunda estación de recarga.

Fuente: Elaboración propia.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	1 y 17	227.7560
1 y 2	220.3075	1 y 18	227.8263
1 y 3	221.3417	1 y 19	220.3426
1 y 4	221.8996	1 y 20	220.5905
1 y 5	222.4608	1 y 21	220.6376
1 y 6	223.6831	1 y 22	220.6830
1 y 7	223.9973	1 y 23	221.6021
1 y 8	225.1606	1 y 24	222.0790
1 y 9	225.7233	1 y 25	222.3268
1 y 10	226.2540	1 y 26	224.1396
1 y 11	226.3431	1 y 27	224.3274
1 y 12	226.5002	1 y 28	225.0059
1 y 13	227.0722	1 y 29	225.4939
1 y 14	227.2663	1 y 30	225.7491
1 y 15	227.4128	1 y 31	226.1044
1 y 16	227.5589	1 y 32	226.1810
		1 y 33	226.2055

Tabla 3: Ubicación de la tercera estación de recarga.

Fuente: Elaboración propia.

Número de Barra	Pérdidas [kW]		
1,2 y 3	221.5580	1,2 y 18	228.04
1,2 y 4	222.1159	1,2 y 19	220.55
1,2 y 5	222.6772	1,2 y 20	220.80
1,2 y 6	223.8996	1,2 y 21	220.85
1,2 y 7	224.2139	1,2 y 22	220.89
1,2 y 8	225.3773	1,2 y 23	221.81
1,2 y 9	225.9401	1,2 y 24	222.29
1,2 y 10	226.4708	1,2 y 25	222.54
1,2 y 11	226.5599	1,2 y 26	224.35
1,2 y 12	226.7171	1,2 y 27	224.54
1,2 y 13	227.2892	1,2 y 28	225.22
1,2 y 14	227.4832	1,2 y 29	225.71
1,2 y 15	227.6298	1,2 y 30	225.96
1,2 y 16	227.7759	1,2 y 31	226.32
1,2 y 17	227.9730	1,2 y 32	226.39
		1,2 y 33	226.42

Tabla 4: Datos del sistema eléctrico.

Fuente: Elaboración propia.

Line No	From Bus	To Bus	R Ω	X Ω	R pu	X pu	Load Receiving End Bus	
							Real Power Load (kW)	Reactive Power Load (kVAR)
1	1	2	0,0922	0,0470	0,0006	0,0003	100	60
2	2	3	0,4930	0,2511	0,0031	0,0016	90	40
3	3	4	0,366	0,1864	0,0023	0,0012	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	0,0024	0,0012	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	0,0051	0,0044	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	0,0012	0,0039	200	100
7	7	8	1,7114	1,2351	0,0044	0,0015	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	0,0064	0,0046	60	20
9	9	10	1,0440	0,7400	0,0065	0,0046	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	0,0012	0,00041	45	30
11	11	12	0,3744	0,1238	0,0023	0,0008	60	35
12	12	13	1,4680	1,1550	0,0092	0,0072	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	0,0034	0,0044	120	80
14	14	15	0,5910	0,5260	0,0037	0,0033	60	10
15	15	16	0,7463	0,5450	0,0047	0,0034	60	20
16	16	17	1,2890	1,7210	0,0080	0,0107	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	0,0046	0,0036	90	40
18	18	19	0,1640	0,1565	0,0010	0,0010	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	0,0094	0,0085	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	0,0026	0,0030	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	0,0044	0,0058	90	40
22	22	23	0,4512	0,3083	0,0028	0,0019	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	0,0056	0,0044	420	200
24	24	25	0,8960	0,7011	0,0056	0,0044	420	200
25	25	26	0,2030	0,1034	0,0013	0,0006	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	0,0018	0,0009	60	25
27	27	28	1,0590	0,9337	0,0066	0,0058	60	20
28	28	29	0,8042	0,7006	0,0050	0,0044	120	70
29	29	30	0,5075	0,2585	0,0032	0,0016	200	600
30	30	31	0,9744	0,9630	0,0061	0,0060	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	0,0019	0,0023	210	100
32	32	33	0,3410	0,5302	0,0021	0,0033	60	40

VI. CONCLUSIONES

Se desarrolló una interfaz de comunicación MatLab – DigSILENT para la solución secuencial de la ubicación óptima de una estación de recarga con ayuda de archivos Excel .csv, los cuales permitieron realizar dicha comunicación.

Se implementó un algoritmo en Matlab, para la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en una red de media tensión, con el soporte de DigSILENT para los cálculos eléctricos teniendo en cuenta que la comunicación con Matlab, no está designada por el programa DigSILENT como lo hace con Phytton.

Por otra parte, el trabajo permitió desarrollar un script para la modificación de parámetros de un modelo de red en media tensión implementada en DigSILENT PowerFactory. Para ello, se elaboró un archivo Excel en el cual se genera y se extrae la información deseada para dicha modificación. Finalmente, el algoritmo se desarrolló para no solo una ubicación de recarga, sino para encontrar las n estaciones de recarga deseadas.

VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el proyecto 2435, titulado "Integración óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en el sistema de distribución local", por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.

VIII. REFERENCIAS

- [1] B.A. Ardila y Y.J. Ochoa, "Ubicación óptima de una estación de recarga pública para vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica", [Trabajo de grado], Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [2] Cerovsky, Zdenek y Pavel-Mindl, "Impact of Energy Production Technology on gas emission by Electric Hybrid and Electric Vehicles." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 1 (3):118-25, 2011.
- [3] Wu, Han, y Dongxiao-Niu, "Study on Influence Factors of Electric Vehicles Charging Station Location Based on ISM and FMICMAC." *Sustainability* 9 (4):1-19, 2017.
- [4] N. Sujitha y S. Krithiga, "Grid tied PV- Electric Vehicle Battery Charger using Bidirectional Converter." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 9 (4), 2019.
- [5] Shareef, Hussain, M Mainul-Islam, and A. Mohamed. "A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64:403-20. doi: 2016. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.033>.
- [6] Moghaddam, A. Akbari, A. Shahrbaaf-Darvazehnoie y A. Delnavaz, "Estimation of Vehicles Movements as a Sustainable Energy Source in Some Main Roads in Iran". *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 9 (4), 2019.
- [7] Catalbas, M.C.M. Yildirim, A. Gulden y H. Kurum, "Estimation of optimal locations for electric vehicle charging stations", Paper presented at the 2017, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 6-9 June 2017.
- [8] Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid, "Guía del Vehículo Eléctrico II", Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2019.
- [9] Mohsenzadeh, Amin, Samaneh Pazouki, Shahab-Ardalan y M. Reza-Haghifam, "Optimal placing and sizing of parking lots including different levels of charging stations in electric distribution networks". *International Journal of Ambient Energy* 39 (7):743-50, 2018.
- [10] Pazouki, Samira y J. Olamaei, "The effect of heterogeneous electric vehicles with different battery capacities in parking lots on peak load of electric power distribution networks". *International Journal of Ambient Energy* 40 (7):734-8, 2019.
- [11] W.E. Rangel y C.L. Jaimes, "Proyección de las redes de distribución eléctricas urbanas de uso residencial ante el escenario de masificación del vehículo eléctrico", [Trabajo de grado] Ingeniería Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, 2017.
- [12] K. Yenchanhalit, Y. Kongjeen, K. Bhumkittipich y N. Mithulanathan, "Optimal Sizing and Location of the Charging Station for Plug-in Electric Vehicles Using the Particle Swarm Optimization Technique", Paper presented at the 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON), 7-9 March 2018.
- [13] Sadeghi-Barzani, Payam, A. Rajabi-Ghahnavieh y H. Kazemi-Karegar, "Optimal fast charging station placing and sizing". *Applied Energy* 125:289-99, 2014.
- [14] Islam, M. Mainul, H. Shareef y A. Mohamed, "Optimal siting and sizing of rapid charging station for electric vehicles considering Bangi city road network in Malaysia", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 24:3933-48, 2016.
- [15] Zheng, Y., Z. Y. Dong, Y. Xu, K. Meng, J. H. Zhao y J. Qiu. "Electric Vehicle Battery Charging/Swap Stations in Distribution Systems: Comparison Study and Optimal Planning." *IEEE Transactions on Power Systems* 29 (1):221-9. 2014.
- [16] J. Sharma, y R.S. Singhal, "Comparative research on genetic algorithm, particle swarm optimization and hybrid GA-PSO. Paper presented at the 2015 2nd International", Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 11-13 March 2015.
- [17] Efthymiou, Dimitrios, K. Chrysostomou, M. Morfoulaki y G. Aifantopoulou, "Electric vehicles charging infrastructure location: a genetic algorithm approach". *European Transport Research Review* 9 (2), 2017.
- [18] S. Lehnhoff, O. Nannen, S. Rohjans, F. Schlogl, S. Dalhues, L. Robitzky, U. Hager y C. Rehtanz. "Exchangeability of power flow simulators in smart grid co-simulations with mosaik", Paper presented at the 2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 13-13 April 2015.
- [19] J. Garcia-Villalobos, I. Zamora, M. Marinelli, P. Eguia y J.I. San Martin. "Co-simulation with DIGSILENT PowerFactory and MATLAB: Optimal Integration of Plug-in Electric Vehicles in Distribution Networks". In *Advanced Smart Grid Functionalities Based on PowerFactory. Green Energy and Technology*, edited by Francisco Gonzalez-Longatt and José Luis Rueda Torres, 67-91. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [20] A. Latif, M. Shahzad, P. Palensky y W. Gawlik, "An Alternative PowerFactory Matlab Coupling Approach", *IEEE*, pp. 486-491. 2015.

- [21] J. Mola-Jimenez, J.L. Rueda, A. Perilla, W.Da, P. Palensky y M. Van Der Meijden, “PowerFactory-Python based assessment of frequency and transient stability in power systems dominated by power electronic interfaced generation”, Paper presented at the 2018 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 10-10 April 2018.
- [22] C. Deckmyn, T.L. Vandoorn, M. Moradzadeh y L.Vandeveldel, “Multi-objective optimization for environomic scheduling in microgrids”, Paper presented at the 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, 27-31 July 2014.
- [23] L. Wonjae, y K. Hak-Young, “Genetic algorithm implementation in Python”, Paper presented at the Fourth Annual ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS'05), 14-16 July 2005.
- [24] S. Tabatabaei, M.N., Aghbolaghi, A.J., Boushehri, N.S. y F.H. Parast, “Reactive Power Optimization Using MATLAB and DigSILENT”, Chapter 11, Springer International Publishing, pp. 411- 474, 2017.
- [25] V.H. Medina, C.A. Avella, y E. Rivas, “Management Platform for a VPP in an Electric System base don Python and DIgSILENT”, International Journal of Applied Engineering Research, 13 (21), 14930-14934, 2018.