

2020

## Modelo para el planeamiento de sistemas de distribución radiales de media tensión con puntos de carga de EV

Carlos Esteban Bravo Herrera  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica)



Part of the [Electrical and Electronics Commons](#)

---

### Citación recomendada

Bravo Herrera, C. E. (2020). Modelo para el planeamiento de sistemas de distribución radiales de media tensión con puntos de carga de EV. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/589](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/589)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

**MODELO PARA EL PLANEAMIENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
RADIALES DE MEDIA TENSIÓN CON PUNTOS DE CARGA DE EV**



**CARLOS ESTEBAN BRAVO HERRERA**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**MODELO PARA EL PLANEAMIENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
RADIALES DE MEDIA TENSIÓN CON PUNTOS DE CARGA DE EV**

**Carlos Esteban Bravo Herrera**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Electricista**

**Director**  
**Andrés Felipe Panesso Hernández, M.Sc.**  
**Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
**BOGOTÁ D.C.**  
**2020**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C., Diciembre de 2020.

*Dedico este trabajo de grado al apoyo y acompañamiento de todas las personas que siempre creyeron en mí y que fueron parte de este proceso, donde lo más importante, además de su culminación, ha sido la transformación que las enseñanzas alcanzadas durante toda mi carrera, han causado en mi vida.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, por permitirme cumplir con excelencia en el desarrollo de este trabajo de grado, sintiendo su gran esfuerzo por formarme paso a paso en el camino con el mejor ejemplo de vida a seguir. Gracias por creer en mí, por la paciencia, el tiempo y dedicación, y gracias nuevamente a Dios por permitirme vivir y disfrutar de cada día.

Agradezco especialmente a mi asesor del trabajo de grado, el Ing. Andrés Felipe Panesso, en primera estancia por creer en mí y permitirme el desarrollo de este trabajo de grado contando con su compromiso, capacidad como director y su gran conocimiento en el ámbito de la investigación, por su apoyo incondicional, sus continuos consejos académicos y personales, y por todas las facilidades que me otorgó en todo este proceso.

Doy gracias especialmente a las personas que estuvieron junto a mí en gran parte del proceso, Julián, Carlos, Kevin y Mauricio, por ser grandes estudiantes y que serán grandes profesionales, por estar en todos los momentos tanto académicos como emocionales y ser personas de apoyo para cualquier situación y siempre impulsarme a ser una mejor persona en todos los aspectos posibles. También, agradezco a mis amigos que quedan de la carrera y personas que estuvieron este último año para mí, por las que guardo un profundo respeto y admiración.

Mi agradecimiento también va dirigido al Programa de Ingeniería Eléctrica, decano, profesores, secretaria y asistente académica, por hacer parte de mi formación siendo docentes y amigos, gracias por todos los aportes que realizaron a nivel académico y de formación personal, así mismo por todo su empeño por mejorar en todos los aspectos del programa. Por último, doy gracias sin olvidar a cada uno de los compañeros de la carrera que día a día en mi desarrollo como estudiante hicieron parte de este logro.

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Descripción del problema.....	14
1.2 Formulación del problema.....	15
1.3 Aportes del proyecto .....	15
1.4 Estructura del documento.....	15
2. MODELO DE PUNTOS DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS VISTOS DESDE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	17
2.1 Aproximaciones para la estimación de la demanda .....	17
2.2 Modelo de ubicación de estaciones de carga.....	18
2.3 Impacto en la demanda e infraestructura eléctrica .....	19
3. DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PUNTOS DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN .....	23
3.1 Sistema de prueba.....	23
3.2 Codificación .....	25
3.3 Optimización en función objetivo .....	26
3.4 Formulación del modelo matemático .....	29
4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS SOBRE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	31
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	38
5.1 Conclusiones generales .....	38
5.2 Recomendaciones .....	38
5.3 Trabajo futuro.....	39
6. REFERENCIAS.....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Tipo, cantidad y variables de control para vehículos convencionales. ....	20
Tabla 2. Energía necesaria de los vehículos eléctricos para el recorrido promedio diario. .	21
Tabla 3. Potencia de recarga de los vehículos eléctricos en una hora. ....	22
Tabla 4. Solución obtenida para el caso 1 para la ubicación de reguladores de tensión. ....	31
Tabla 5. Solución obtenida para el caso 2 para la ubicación de reguladores de tensión. ....	32
Tabla 6. Solución obtenida para el caso 3 para la ubicación de reguladores de tensión. ....	32
Tabla 7. Solución obtenida para el caso 4 para la ubicación de reguladores de tensión. ....	32
Tabla 8. Solución obtenida para el caso 5 para la ubicación de reguladores de tensión. ....	33
Tabla 9. Solución obtenida para el caso final para la ubicación de reguladores de tensión.	33



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Curva de demanda promedio en Colombia. ....	20
Figura 2. Curva de carga total de los VE para recarga en hora pico de 18:00 a 21:00 .....	22
Figura 3. Topología del sistema radial de 33 nodos.....	23
Figura 4. Perfil de potencia diario para diferentes tipos de carga.....	24
Figura 5. Codificación del problema.....	25
Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo con el flujo radial implementado.....	26
Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.....	27
Figura 8. Ubicación de reguladores de tensión en el circuito, caso final.....	34
Figura 9. Perfil de tensión sin considerar la ubicación de reguladores de tensión.....	34
Figura 10. Perfil de tensión considerando reguladores de tensión en hora pico (19:00) en los nodos de la Figura 8. ....	35
Figura 11. Pérdidas en la red sin considerar la ubicación de reguladores de tensión. ....	35
Figura 12. Pérdidas en la red considerando reguladores de tensión en hora pico (19:00) en los nodos de la Figura 8. ....	36
Figura 13. Optimización de la función objetivo con el algoritmo genético.....	37

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

AG	Algoritmo genético.
$C_{sistema}^{max}$	Capacidad máxima en potencia del sistema.
$C_{r_{i,k}}$	Tarifa de costo de cada regulador de tensión.
$C_l$	Tarifa del operador de red cobrada al usuario.
CFRLM	Modelo de ubicación de reabastecimiento de combustible capacitado (en. <i>Capacitated Flow Refueling Location Model</i> ).
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas.
FRLM	Modelo de ubicación de reabastecimiento de combustible (en. <i>Flow Refueling Location Model</i> ).
IEEE	Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (en. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ).
$I_{ij,t}$	Flujo de corriente que circula en un tramo de la red en un periodo $t$ .
$i, ij$	Subíndices, asociados a los nodos y los tramos de la red del sistema de distribución, respectivamente.
$I_{ij}^{max}$	Corriente máxima en un tramo $ij$ en el sistema de distribución.
$\bar{K}$	Número máximo de reguladores.
MCLP	Problema de ubicación de cobertura máxima (en. <i>Maximal Covering Location Problem</i> ).
$N$	Número de nodos del sistema.
$P_i^D$	Potencia activa demandada por la carga convencional en el nodo $i$ en el periodo $t$ .
$P_i^G$	Potencia activa generada por la carga convencional en el nodo $i$ en el periodo $t$ .
$PEV_i^D$	Potencia activa demandada por el VE en el nodo $i$ en el periodo $t$ .
$P_{G,i}^{max}$	Potencia activa máxima generada en el nodo $i$ en un periodo $t$ .
$Q_{G,i}^{max}$	Potencia reactiva máxima generada en el nodo $i$ en un periodo $t$ .
$P_{carga}^{nom}$	Potencia nominal de carga.
$Q_i^D$	Potencia reactiva demandada por la carga convencional en el nodo $i$ en el periodo $t$ .
$Q_i^G$	Potencia reactiva generada por la carga convencional en el nodo $i$ en el periodo $t$ .

$R_{ij}$	Resistencia del tramo $ij$ de la red del sistema de distribución.
SDR	Sistemas de distribución radial.
$S_{r_{i,k}}$	Potencia aparente del regulador de tensión.
$t$	Intervalo de tiempo.
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética.
VE	Vehículo eléctrico.
$V_{i,t}$	Tensión en un nodo $i$ en un periodo $t$ .
$V_i^{min}$	Tensión mínima en los nodos en el sistema radial.
$V_i^{max}$	Tensión máxima en los nodos en el sistema radial.
$X_{ij}$	Reactancia del tramo $ij$ de la red del sistema de distribución.
$x_i$	Potencia nominal de recarga de los vehículos eléctricos.
$\alpha_i$	Grado de penetración de inclusión de punto de carga de VE visto como un regulador de tensión.

## GLOSARIO

**CAPACIDAD INSTALADA:** Corresponde a la suma de las potencias nominales de los equipos (transformadores, generadores, entre otros), instalados a líneas que suministran la potencia eléctrica a las cargas o servicios conectados. Es llamada también capacidad nominal del sistema (Ramírez, 2004).

**CARGA INSTALADA:** Es la suma de todas las potencias nominales continuas de los aparatos de consumo conectados a un sistema o a parte de él, se expresa generalmente en kVA, MVA, kW o MW (Ramírez, 2004).

**CURVA DE CARGA DIARIA:** Las curvas de carga diaria es una representación gráfica que están formadas por los picos obtenidos en intervalos de una hora para cada hora del día. Las curvas de carga diaria dan una indicación de las características de la carga en el sistema (Ramírez, 2004).

**REGULACIÓN EN UNA LÍNEA:** Se constituye en uno de los parámetros de diseño más decisivos en el cálculo de redes de distribución; la escogencia del calibre adecuado para una red está directamente relacionado con la regulación de tensión (Ramírez, 2004).

**PÉRDIDAS EN UNA LÍNEA:** Son tanto de energía como de potencia, y ambos tipos de pérdidas tienen un costo económico para las empresas; el de las pérdidas de energía es el costo marginal de producir y transportar la energía adicional; el de las pérdidas de potencia es el costo marginal de inversión de capital, requerido para generar y transmitir esa potencia adicional a través del sistema (Ramírez, 2004).

**SISTEMA RADIAL:** Un sistema radial es el más empleado por ser fácil de diseñar y de operar. La mayoría de los sistemas secundarios para servicio residencial urbano y rural y para iluminación comercial son diseñados en forma radial. Es el sistema que tiene el costo inicial más bajo. Requieren de conductores de gran calibre, su cobertura es limitada y una falla puede afectar todo el circuito (Ramírez, 2004).

**VEHÍCULOS ELÉCTRICOS:** Este tipo de vehículo tiene muchas ventajas, como bajo consumo de energía, alta eficiencia de carga y cero contaminaciones del aire (Gong, Cao, & Zhao, 2017). Este es propulsado por uno o más motores eléctricos, usando energía eléctrica almacenada normalmente en baterías recargables.

## RESUMEN

Los vehículos eléctricos representan hoy en día un avance en la movilidad y la tecnología en las grandes ciudades del país, por esto es necesario tener un sistema de distribución capaz de soportar esta nueva carga, lo que obliga a la evaluación de los impactos en el sistema eléctrico. En el presente trabajo se presenta un modelo para el planeamiento de sistemas de distribución considerando la ubicación de reguladores de tensión para contrarrestar los efectos adversos que la inclusión de VE pueda generar sobre los perfiles de tensión y pérdidas de potencia en la red. Este estudio se realiza planteando dos escenarios, con la inclusión y la no inclusión de las estaciones de carga de VE, esto con el fin de mostrar la ubicación óptima de reguladores de tensión buscando maximizar el beneficio al operador, es decir, minimizar los costos anualizados que implican ubicar el regulador al tiempo que se evalúa el costo de las pérdidas de potencia durante la vida útil del regulador. De esta manera se observó que, para beneficio del operador, los reguladores se ubican en los nodos más cercanos al nodo de generación, siendo también los nodos de bifurcación, ya que en estos es notable la disminución en las pérdidas totales en la red generando así la posibilidad de contar con reguladores de tensión en el sistema para maximizar las ganancias al operador.

*Palabras clave* – Flujo de potencia, Pérdidas en la red, Perfil de tensión, Regulador de tensión, Vehículo eléctrico.

## **ABSTRACT**

Nowadays, Electric Vehicles (EV) represent an advance in mobility and technology in the large cities of the country, for this reason it is necessary to have a distribution system capable of supporting this new load, which requires the evaluation of impacts on the electrical system electric. In this paper, a model for the planning of distribution systems is presented considering the location of voltage regulators to counteract the adverse effects that the inclusion of EV can generate on the voltage profiles and power losses in the network. This study is carried out proposing two scenarios, with the inclusion and non-inclusion of EV charging stations, this in order to show the optimal location of the voltage regulators seeking to maximize the benefit to the operator, that is, to minimize costs annualized costs that involve locating the regulator while evaluating the cost of power losses over the life of the regulator. In this way, it was observed that, for the benefit of the operator, the regulators are located in the nodes closest to the generation node, also being the bifurcation nodes, since in these the decrease in total losses in the network is notable, thus generating the possibility of having voltage regulators in the system to maximize profits for the operator.

*Index Terms* - Electric vehicle, Power flow, Power losses, Voltage profile, Voltage regulator.

# 1. INTRODUCCIÓN

En comparación con los automóviles de combustible fósil, los VE presentan ventajas como su bajo consumo de energía, alta eficiencia de carga y la contaminación del aire por emisiones de gases es aproximadamente nula (Gong, Cao, & Zhao, 2017). En los últimos años, el incremento en la conexión de vehículos eléctricos ha mostrado impactos de gran consideración en el sistema de energía y que resaltan la importancia de estudios cuyo aporte se centre en un adecuado modelado de estaciones de carga para los VE (Xie & Luan, 2011; Alame, Azzouz, & Kar, 2020).

La demanda necesaria para suplir el uso de cargas con nuevas tecnologías en el sistema de distribución, como las asociadas a la movilidad eléctrica, puede generar variaciones en la operación del sistema tales como incremento de pérdidas de potencia, desbalances en el flujo de potencia y variaciones en los perfiles de tensión. Además, pensando de forma preventiva, el incremento en la adquisición de VE podría la causa de nuevas investigaciones relacionadas con la penetración de estos en redes de distribución, debido a su alta demanda y efectos en la calidad de potencia (Marcincin, Medvec, & Moldrik, 2017).

Actualmente, la baja demanda de vehículos eléctricos en el país, solicita un análisis del impacto que podría generar la conexión de un nuevo punto de carga para VE en los sistemas de distribución y cómo este se puede ver reflejado tanto en las pérdidas de potencia como en la regulación de tensión.

Es así como el presente trabajo incluye una metodología para la adaptación de un sistema de prueba radial en el que se incluyen puntos de carga de vehículos eléctricos, con el fin de determinar la solución más apropiada para soportar el incremento de estas nuevas cargas usando tecnologías convencionales y que permitan la planificación de la red con incorporación de nuevos elementos en el sistema, en el corto plazo.

## 1.1 Descripción del problema

Teniendo en cuenta el panorama real y de transición que tiene el sistema energético actual al tratar de disminuir y mitigar los daños ambientales, la movilidad eléctrica propone ser una de las mejores opciones para disminuir la contaminación, así mismo, generar energía por medio de los *Vehicles to Grid*, es decir la generación distribuida. En el *Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2017-2031* de la UPME (2017), se proyecta que para el año 2030 entrarán alrededor de 400.000 vehículos eléctricos a las redes de distribución

colombianas. La entrada de vehículos eléctricos trae consigo la implementación de puntos de carga para los mismos. Por consiguiente, es importante investigar y analizar los diferentes efectos que tienen los puntos de carga en los sistemas de distribución, para de esta manera diseñar un algoritmo para la adecuada planeación de estas redes y que incluyan nuevos puntos de carga.

Por tanto, en este trabajo de grado se realiza la propuesta de un modelo de planeamiento para sistemas de distribución radiales de media tensión que incluya puntos de carga de vehículos eléctricos, así como su efecto en las pérdidas y la regulación de tensión.

## **1.2 Formulación del problema**

Con este trabajo se propone una respuesta al interrogante ¿Cómo se ve afectado un sistema de distribución con la inclusión de estaciones de carga de vehículos eléctricos? Frente al desarrollo por parte del país en busca de nuevas tecnologías, líneas como la movilidad eléctrica buscan dar una solución al sistema energético actual al tratar de disminuir y mitigar los daños ambientales. Es así como la movilidad eléctrica trae muchos beneficios para las ciudades, pues ayuda a mejorar la calidad de vida de sus habitantes al reducir las emisiones de material particulado, por esto se necesita generar un sistema que pueda determinar diferentes parámetros como la generación distribuida y así, a partir de los cálculos de diseño evaluar factores como potencia, tensión y flujos de carga para determinar el comportamiento del vehículo en el sistema en un determinado tiempo.

## **1.3 Aportes del proyecto**

El presente trabajo presenta un análisis de la afectación en la red de distribución por parte de los vehículos eléctricos, así como un modelo de planeamiento para la incorporación de reguladores de tensión que permitan mitigar los efectos en pérdidas y regulación de tensión.

## **1.4 Estructura del documento**

Este documento está dividido en cinco capítulos, en los cuales se hace inicialmente una presentación de los proyectos guía y el fin con el que se pretende dar solución a un problema que se viene presentando, la inclusión de la movilidad eléctrica en las redes de distribución. Así mismo, en el primer capítulo se determina la descripción y formulación del problema.



El capítulo dos hace referencia a todos los parámetros para desarrollar el modelo de los puntos de carga de vehículos eléctricos vistos desde la red de distribución, proponiendo el proceso determinístico de selección de carga de VE teniendo en cuenta las proyecciones dadas por el país y las decisiones de carga por parte de los conductores. Además, en el tercer capítulo se da a conocer el sistema de prueba y se propone un modelo de ubicación para las estaciones de carga analizando diferentes escenarios que permitan dar un conocimiento cercano del comportamiento en la red de distribución.

En el cuarto capítulo se evalúa el impacto de los vehículos eléctricos presentando el comportamiento en pérdidas y regulación de tensión en los diferentes escenarios planteados. Las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros son los aspectos que conforman el quinto capítulo.

Finalmente, se presenta a modo de anexo los datos del sistema de prueba y los datos de demanda de energía en Colombia.

## **2. MODELO DE PUNTOS DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS VISTOS DESDE LA RED DE DISTRIBUCIÓN**

En este capítulo se presenta un modelo que incluya los puntos de carga de vehículos eléctricos considerando sus respectivas restricciones, con el fin de mostrar cómo es el comportamiento de la estación vista desde la red de distribución de media tensión. Se parte de diferentes deducciones en las que se incluyen restricciones que permitan acotar y ajustar el modelo propuesto.

Es importante aclarar que, para darle un enfoque más realista a este trabajo se busca para la red de prueba, mejorar la operación considerando que se va a incrementar la demanda con la inclusión de los vehículos eléctricos y la ubicación de los puntos de carga de estos. Es por esto por lo que el planteamiento del modelo se basa en la ubicación óptima de reguladores de tensión desde el punto de vista del operador de red. Posteriormente, se presentan las ecuaciones a emplear, el tipo de sistema de recarga, curvas de demanda diaria y cómo un punto de carga es visto por la red. Así, se parte de todas las consideraciones de diseño con la ayuda del *software* Matlab<sup>®</sup>.

### **2.1 Aproximaciones para la estimación de la demanda**

En primer lugar, para la ubicación de las estaciones de carga de vehículos eléctricos es de gran importancia estimar el valor de la demanda. Es así como algunos investigadores, utilizan datos estadísticos como punto de partida para estimar la demanda debido a la falta de datos realistas y precisos. Dichos datos estadísticos consideran variables como número de residentes (Ip, Fong, & Liu, 2010), datos de propiedad del vehículo (Rosso, 2010; Sadegui, Rajabi, & Kazemi, 2014), distribución de estaciones de servicio (Liu, 2012), entre otros, para aplicar un método de regresión que permita estimar la demanda de cobro. También se tienen enfoques distintos, como el de Sadegui, Rajabi, & Kazemi (2014), quienes estiman la demanda considerando los destinos de los conductores (nodos finales).

Además, puede verse que las características de los diferentes usos de los vehículos eléctricos se predicen y sirven para estimar la carga del vehículo a mediano y largo plazo; los datos estadísticos son útiles para estimar el número de VE; sin embargo, tratar el número de vehículos eléctricos como demanda puede no ser exacto ya que no se considera el uso de estos.

Otro aspecto que vale la pena mencionar, es que en contraste con los vehículos de gasolina que solo demoran unos minutos en reabastecerse de combustible, los vehículos eléctricos pueden tardar al menos 30 minutos para recargarse por completo en estado de carga rápida, por lo que es probable que los conductores de vehículos eléctricos prefieran cargar al final de un viaje en lugar de hacerlo en medio de un recorrido.

## **2.2 Modelo de ubicación de estaciones de carga**

Los modelos de ubicación en función de la representación de la demanda podrían dividirse en: modelo de ubicación de captura de flujo y modelo de ubicación de demanda puntual.

La demanda del modelo de ubicación de captura de flujo está asociada con la ruta del viaje, que se denomina flujo. El objetivo de este modelo es ubicar las instalaciones para capturar los flujos en la mayor cantidad posible. En primer lugar, Hodgson (1990) propuso el modelo de asignación de ubicación de captura de flujo y junto con otros investigadores desarrollaron un FRLM considerando la limitación de alcance de vehículo. En complemento, Upchurch, Kuby, & Lim (2009), presentaron un modelo de CFRLM que limita el número de vehículos que se reabastecen de combustible en cada estación.

Por otra parte, el modelo de ubicación de demanda puntual supone que la demanda se considere en lugares distintos; la unidad básica de la demanda es un objeto espacial basado en el área poligonal en un espacio geográfico. Los modelos representativos incluyen el objetivo de minimizar el costo total del viaje, minimizar el costo máximo del viaje y el MCLP para maximizar la cobertura de la demanda bajo un cierto número de instalaciones.

A diferencia de los vehículos de combustión, es más probable que los conductores de vehículos eléctricos carguen al final de un viaje en lugar de en medio de un viaje en el área urbana, porque el tiempo de carga se puede considerar relativamente largo en comparación con los tiempos de llenado de combustible líquido. Por lo tanto, el modelo de ubicación de captura de flujo parece ser el más adecuado para ubicar estaciones de carga en lugares de paso, y muchos investigadores emplearon el modelo de ubicación de demanda puntual al ubicar estaciones de carga en el área urbana. Un ejemplo es el de Asamer, Reinthaler, Ruthmair, Straub, & Puchinger (2016), quienes emplearon el modelo MCLP para seccionar regiones para colocar estaciones de carga con el objetivo de maximizar la suma de los recuentos de viaje en taxis. Igualmente, al apuntar a conductores de VE convencionales, se deben considerar las características de viaje, y así, los viajes diarios para este tipo de conductores usualmente son invariables, lo que hace que la predicción del uso del vehículo eléctrico respecto a sus actividades sea administrada.

Por lo tanto, con el objetivo de cumplir con el modelado de puntos de carga de vehículos eléctricos este se expresa a lo largo del presente capítulo, indicando las respectivas restricciones en el modelo y cumpliendo con todos los requisitos de la demanda de los VE visto desde la red de distribución.

### **2.3 Impacto en la demanda e infraestructura eléctrica**

Para determinar el impacto que tienen los puntos de carga de vehículos eléctricos, inicialmente se deben considerar los elementos que hacen parte de tal análisis, en esto se encuentra la información de la red de distribución, la representación del perfil de consumo, la caracterización de los datos del VE y finalmente la determinación de la carga total.

Los tipos de sistemas de recarga se definen considerando los siguientes criterios:

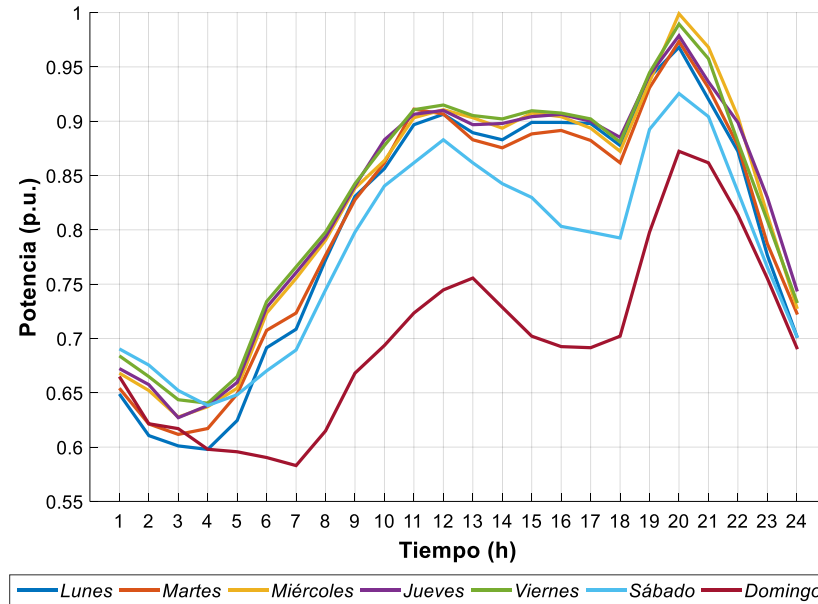
- Hábitos de uso y conducción que emplean los vehículos convencionales para así, determinar el recorrido promedio diario en kilómetros.
- La curva de carga diaria la cual es elaborada teniendo en cuenta no solo la demanda operativa, sino los precios ofertados por generadores y las demás restricciones, eléctricas y operativas, que se puedan presentar en el sistema (XM, 2020).
- Potencia de recarga disponible para el promedio de vehículos eléctricos que se encuentran en el mercado. Según el documento presentado por la UPME (2017) estos son 3,7 kW, 11,0 kW, 22,0 kW, 43,5 kW y 50,0 kW.

El consumo de energía en el país se encuentra caracterizado por el tipo de día (ordinario o festivo) y la hora en la que se encuentra. Adicional a esto, existen tres puntos importantes que caracterizan la demanda, estos son de 5:00 a 7:00, de 11:00 a 13:00 y de 18:00 a 21:00 horas. Para evaluar el efecto de cuándo se realizar la recarga, se consideran las siguientes estrategias de gestión de recarga del VE:

- Recarga de VE en horas de máximo consumo entre 18:00 a 21:00 siendo este el punto de mayor consumo de potencia eléctrica en el país, esto debido a que los usuarios de VE típicamente tenderían a recargar el auto a la hora de llegar a la casa, al terminar la jornada laboral.
- El grado de penetración proyectado de los vehículos eléctricos se define con criterio arbitrario, considerando cada potencia de recarga de vehículos eléctricos y que no exceda la capacidad de potencia máxima del sistema.

En la Figura 1 se observa la energía total que se está consumiendo en el país, en la que se observan que los picos de demanda se encuentran en el lapso comprendido entre las horas 18 y 21.

Figura 1. Curva de demanda promedio en Colombia.



Fuente: Datos tomados de (XM, 2020). Elaboración propia.

Una vez definido el escenario que se va a desarrollar, el fin de este es permitir caracterizar la posible ocurrencia que puede darse en el sistema y cuál es la respectiva consecuencia. Considerando dicho escenario se tuvieron en cuenta las curvas de carga que se esperan en la recarga de los vehículos, para esto se tiene en cuenta la siguiente información mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipo, cantidad y variables de control para vehículos convencionales.

Automóviles	Vehículos oficiales	Buses	Motocicletas	Taxis
7.000	9.000	250	10.000	49.000
Recorrido promedio diario		32 km		
Grado de penetración		20% - 40% - 60%		

Fuente: Datos tomados de (UPME, 2017).

Para satisfacer el grado de penetración en la inclusión de los puntos de carga de vehículos eléctricos, se plantea una restricción en el modelo en proyección de demanda para una

cantidad de potencia total que incluya un factor de ponderación que incluya ese grado de penetración.

En primer lugar, es importante dejar definido cómo se va a dividir ese grado de penetración, por lo que, para cada potencia de recarga (3,7 kW, 11,0 kW, 22,0 kW, entre otros) se incluye un porcentaje de penetración en cada tipo, como se presenta en la ecuación (2.1).

$$\bar{\alpha} \cdot \bar{X} \leq C_{sistema}^{max} \quad (2.1)$$

En la que el factor de ponderación  $\bar{\alpha}$  indica el valor porcentual del grado de penetración, cumpliendo para cada tipo de recarga un 100% en la inclusión de los puntos de carga de VE. De esta manera se puede representar que la inclusión de las estaciones de carga no debe sobrepasar la capacidad de potencia máxima del sistema ( $C_{sistema}^{max}$ ) como se presenta en la ecuación (2.2).

$$\bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{bmatrix} \therefore \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad ; \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \mid x_i = P_{carga}^{nom} \quad (2.2)$$

Donde cada  $\alpha_i$  representa el grado de penetración de punto de carga y el vector  $\bar{X}$  indica la potencia nominal de recarga de los vehículos eléctricos.

Posteriormente considerando el escenario extremo, cuando todos los vehículos recargan en los picos de demanda diaria, se busca mostrar un punto de partida para las diferentes posibilidades de recarga, teniendo en cuenta, un tope máximo de inversión que será necesario para abastecer adecuadamente al vehículo eléctrico. De esta manera se presenta en la Tabla 2 la energía necesaria para el recorrido del vehículo.

Tabla 2. Energía necesaria de los vehículos eléctricos para el recorrido promedio diario.

Consumo promedio de los VE (kWh/km)	Recorrido diario promedio (km)	Consumo de energía para el recorrido diario promedio (kWh)
0,2	32	6,4

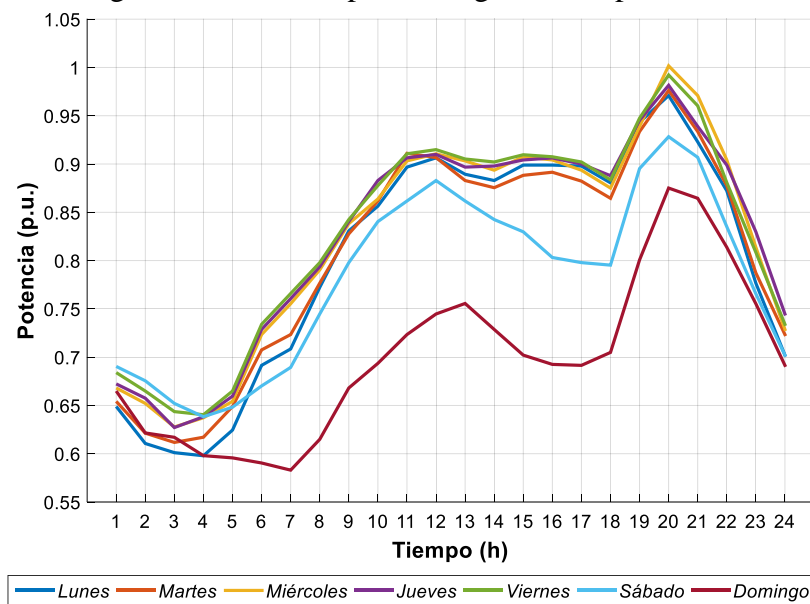
Para elaborar la curva de carga con la incursión de los vehículos eléctricos, se tienen en cuenta los parámetros mencionados anterior y finalmente la potencia de recarga del vehículo eléctrico en una hora presentada en la Tabla 3.

Tabla 3. Potencia de recarga de los vehículos eléctricos en una hora.

3,7 kW	11,0 kW	22,0 kW	43,5 kW	50,0 kW	Potencia total (kW)
0,74	2,2	4,4	8,7	10,0	26,04

En la Figura 2 se presenta el caso que muestra el impacto que tiene los vehículos eléctricos en las redes de distribución con la potencia de recarga en una inclusión del 20%. El objetivo del análisis del caso es cuantificar el impacto que distintas estrategias de recarga del VE tienen en las inversiones de las redes de distribución eléctrica.

Figura 2. Curva de carga total de los VE para recarga en hora pico de 18:00 a 21:00 horas.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se presenta la carga total de la red de distribución, teniendo en cuenta los vehículos eléctricos:

- Carga promedio de la hora en el país sin tener en cuenta los VE: 7,4773 GW como se muestra en la Figura 1.
- Carga total de la red: 7,4774 GW como se presenta en la Figura 2 con la inclusión de los puntos de carga de VE.

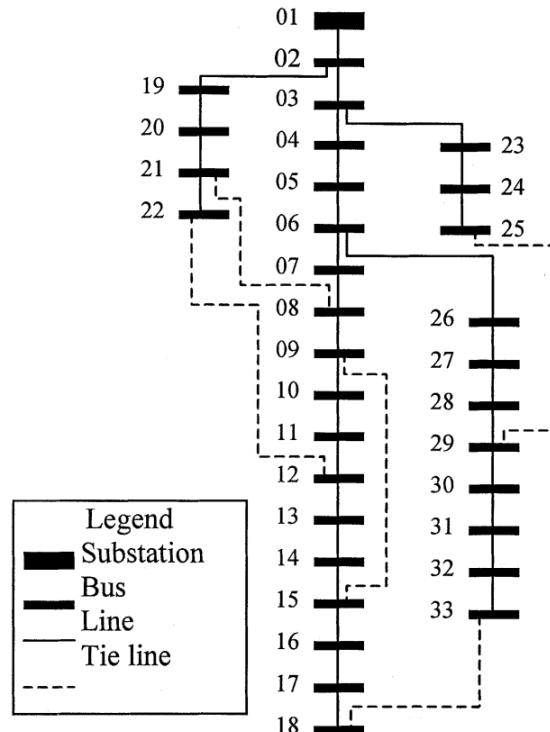
### 3. DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL PLANEAMIENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN CON PUNTOS DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Es considerable en la implementación, evaluar los diferentes impactos de los puntos de carga en el sistema de distribución, ya que es importante modelar la carga y el comportamiento de estas, por lo que en este capítulo se explica la metodología a emplear. Inicialmente se presenta el sistema de prueba y posteriormente los escenarios a emplear con la inclusión de los puntos de carga de VE.

#### 3.1 Sistema de prueba

En primer lugar, para realizar dicho proceso, se toma como base un SDR de 33 nodos del IEEE que opera a 12,66 kV y cuya topología se observa en la Figura 3. Este alimentador tiene una demanda de potencia activa y reactiva de 3.715 kW y 2.300 kVAr, respectivamente (Venkatesh, Ranjan, & Gooi, 2004).

Figura 3. Topología del sistema radial de 33 nodos.



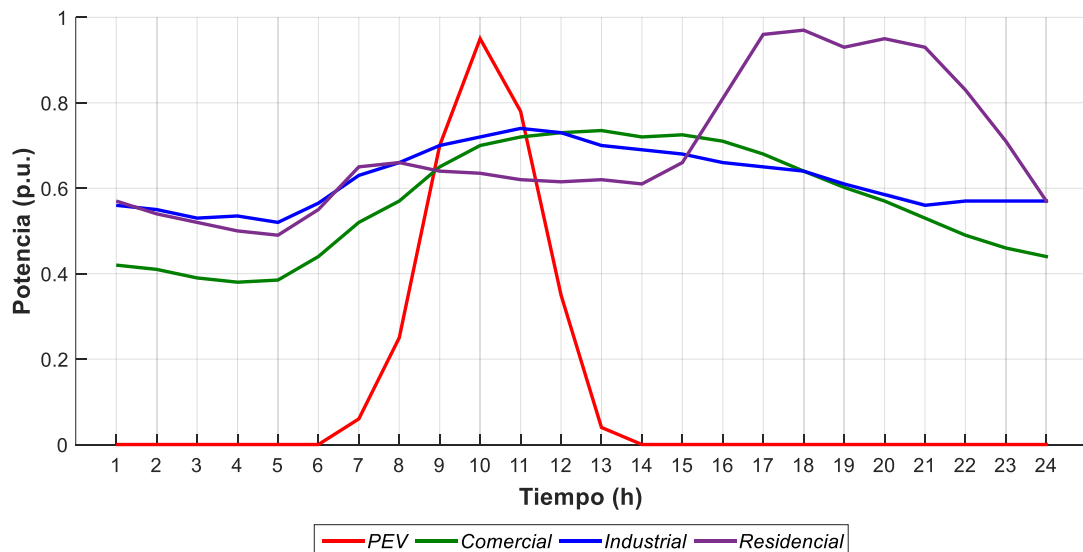
Fuente: Tomada de (Venkatesh, Ranjan, & Gooi, 2004).



El problema por resolver es presentado a través de un modelo matemático no lineal, que está compuesto por diferentes escenarios a analizar, partiendo de la no inclusión de los vehículos eléctricos, la inclusión y los periodos de carga que estos presenten en un sistema de distribución con el fin de observar el comportamiento de las variables más relevantes. Posteriormente, se divide el concepto o modelo en dos estados, el sistema de distribución sin puntos de carga de VE y el sistema con la inclusión de estos.

Para el presente trabajo se pone en consideración diferentes escenarios para evaluar la implementación de puntos de carga de vehículos eléctricos en la red (PEV), en este se define un valor de demanda el cual se va a ubicar en los nodos 15, 16, 22 y 24 (Alame, Azzouz, & Kar, 2020).

Figura 4. Perfil de potencia diario para diferentes tipos de carga.



Fuente: Datos tomados de (Alame, Azzouz, & Kar, 2020). Elaboración propia.

En el artículo de Alame, Azzouz, & Kar (2020) se conectaron al sistema de distribución diversas cargas, incluidas tipo residencial, comercial e industrial con los perfiles de energía diaria como se observa en la Figura 4. La selección de los nodos correspondientes a cada tipo de carga es tomada de (Agostini, Bignucolo, Coppo, Turri, & Schwidtal, 2019). El perfil de potencia de VE en la figura describe el perfil de potencia carga no controlada, es decir, basado en orden de llegada en la captura de datos, que se construyó utilizando datos proporcionados por la autoridad de estacionamiento de Toronto (TPA - *Toronto Parking Authority*).

### 3.2 Codificación

La codificación de este problema es parte fundamental para que sea resuelto correctamente, en especial cuando se emplean técnicas metaheurísticas de optimización como lo es el algoritmo genético. La codificación consiste en representar una posible solución de un problema en el espacio de soluciones de este. Es importante tener en cuenta que no siempre la forma de codificar una posible solución está relacionada con las variables de decisión de dicho problema.

Es importante a la hora de realizar la codificación verificar si la misma representación del espacio de soluciones genera una posible solución factible o infactible. Normalmente, la misma codificación garantiza que no sean considerables opciones infactibles, garantizando así que cualquier posible solución que se evalúe sea factible. Se dice que una propuesta de solución está eficientemente codificada en una técnica de optimización metaheurística cuando los operadores genéticos se implementan fácilmente (Gallego, Escobar, & Toro, 2008).

El modelo planteado está dividido en dos vectores de entrada: las variables binarias [ $y_j$ ] y los posibles nodos candidatos [ $Y$ ], es importante para el análisis que cuenten con las mismas dimensiones. La variable  $y_j$  corresponde al valor de 1 si se construye una estación de recarga y de 0 si no se construye, finalmente el vector  $Y$  es el conjunto de nodos propuestos para la instalación de la estación de carga de VE.

Figura 5. Codificación del problema.

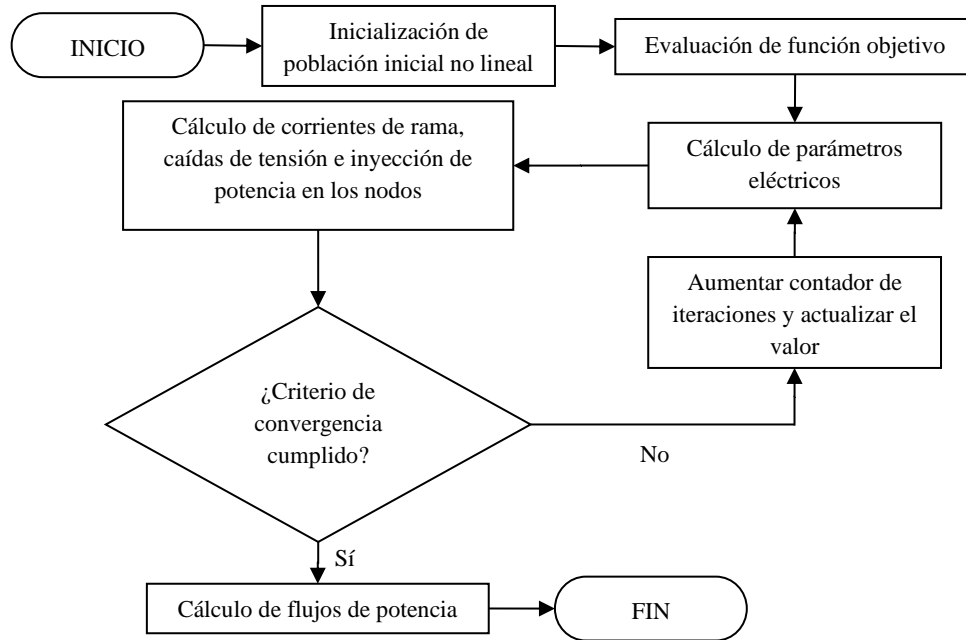
$$y_j = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Variable binaria} & & & \\ \hline 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$Y = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \text{Nodos candidatos} & & & \\ \hline 15 & 16 & 22 & 24 \\ \hline \end{array}$$

En la Figura 5, se muestra cómo se codifica este problema donde  $y_j$  y  $Y$  son vectores fila que contienen la variable binaria de decisión y los nodos candidatos respectivamente, donde al nodo propuesto en la posición  $x$  se le adiciona un factor que multiplica todo el vector en la misma posición  $x$ , que corresponde al costo que representa ubicar el regulador, se puede también interpretar como, al nodo 16 le corresponde ubicar un regulador de tensión antes del nodo de la carga y este vector estará multiplicado por el costo que representa ubicar el regulador en tal posición.

Así, la estructura del modelo propuesto que se va a realizar se presenta en la Figura 6 que busca reunir todos los criterios mencionados anteriormente.

Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo con el flujo radial implementado.



Fuente: Elaboración propia.

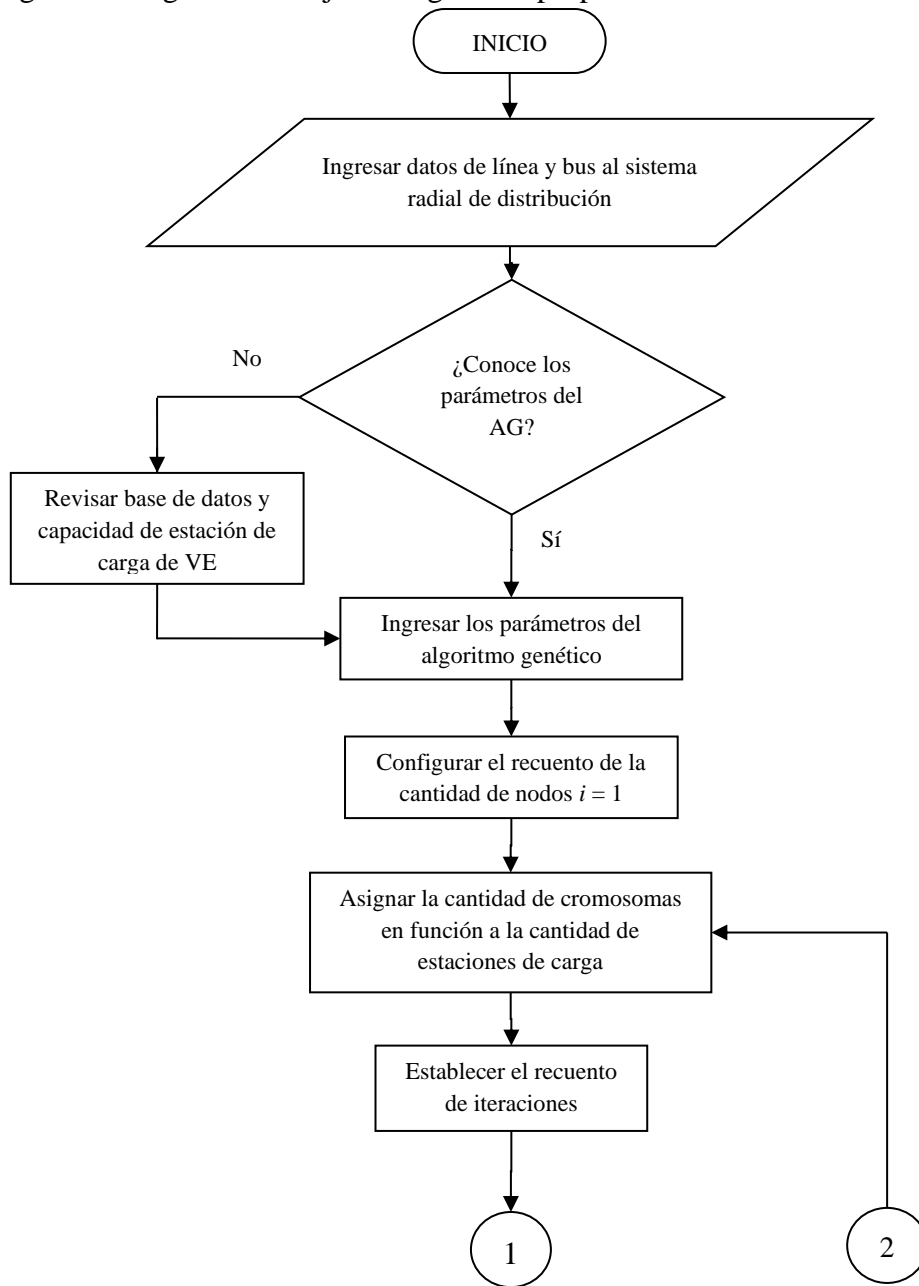
### 3.3 Optimización en función objetivo

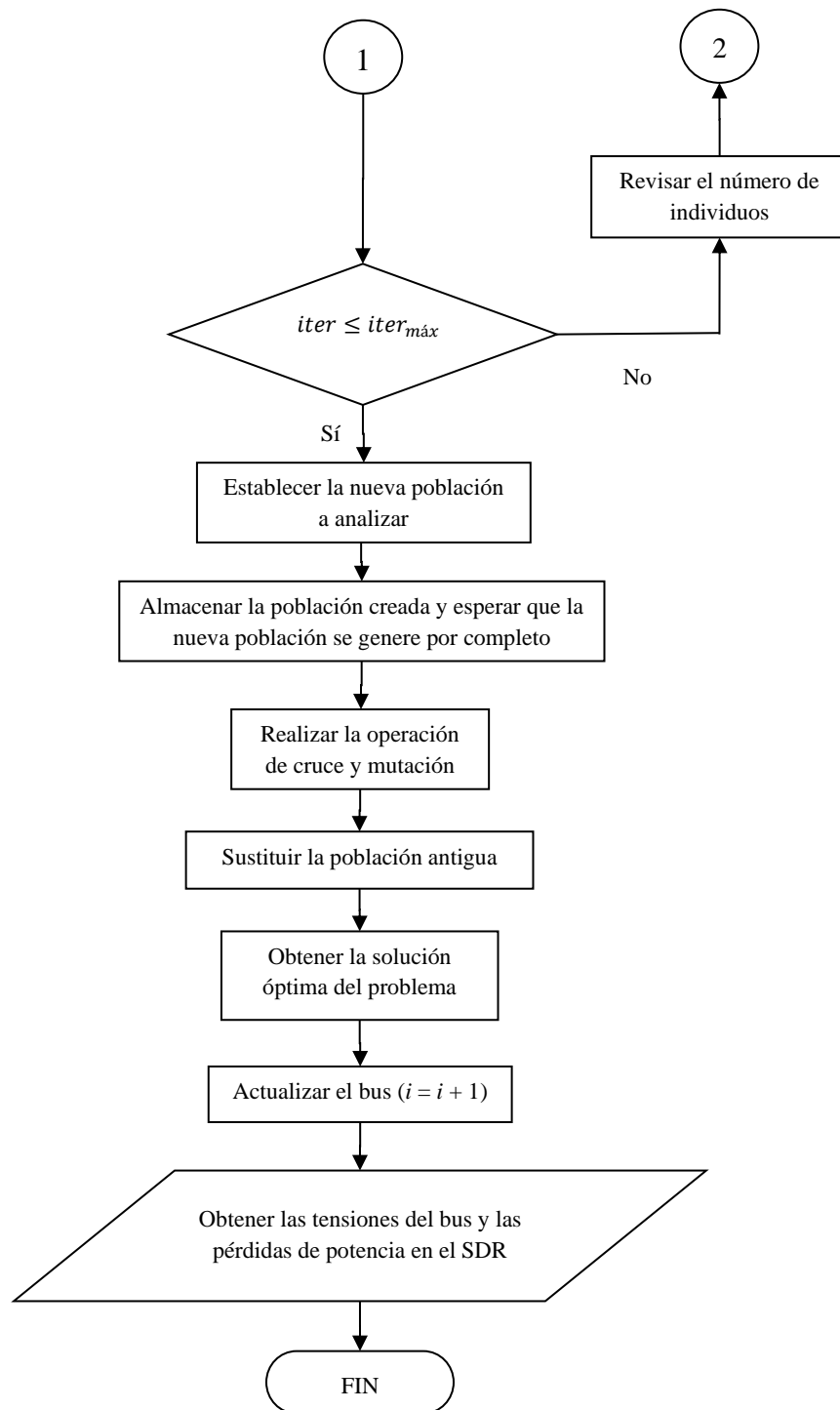
Un aspecto fundamental para que el AG tenga un buen desempeño, es determinar una adecuada función objetivo o también denominada, función de adaptación (*Fitness function*). Esta función de adaptación debe determinar si los individuos de la población tienen una buena solución o es mala; al mismo tiempo, esta función debe permitir una clara diferenciación entre las diferentes configuraciones de la población para facilitar el proceso de selección ya que los valores de dicha función se utilizan durante la implementación del operador de selección (Gallego, Escobar, & Toro, 2008).

Como se ha comentado anteriormente, el problema actual es un problema no lineal restringido. El uso de técnicas clásicas de programación matemática para resolver este tipo de problema no es factible, por lo tanto, se consideran algoritmos evolutivos para el problema actual. El algoritmo genético es un método de búsqueda y aprendizaje inspirado en el proceso de evaluación natural y genética.

El método aplicado consta de un algoritmo genético programado para maximizar la potencia de demanda del vehículo eléctrico junto con las pérdidas de potencia como se expresó en la función objetivo. Para explicar de manera general el método empleado, se plantea el diagrama de flujo de la Figura 7.

Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.





Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el algoritmo a emplear se prueba en Matlab®, los parámetros de la función objetivo se establecen con base en el sistema radial de prueba.

### 3.4 Formulación del modelo matemático

Teniendo en cuenta que se busca la solución óptima para el operador de red, se expresa la formulación del modelo matemático en función de reguladores de tensión para saber en qué hora es mejor ubicar la estación de carga del VE.

Es así como, en el presente numeral, se muestra la formulación detallada del modelo matemático con la implementación de los puntos de carga de vehículos eléctricos para observar cómo se va a ubicar en el algoritmo genético la función objetivo y las restricciones. De esta manera, la ecuación (3.1) representa la función objetivo en un periodo de tiempo de un día (24 horas). la función objetivo que se presenta en términos de, presencia o ausencia de un regulador multiplicada por la tarifa de costo de cada regulador [\$/kVA] y finalmente multiplicado por la potencia aparente del regulador [kVA]; posteriormente se suma la tarifa del operador de red cobrada al usuario [\$/kWh] multiplicado por las pérdidas en el nodo [kW] en el determinado periodo definido.

$$\text{Min} \left\{ z = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot C_{r_{i,k}} \cdot S_{r_{i,k}} + C_l \sum_{t=1}^T \sum_{ij=1}^{N-1} I_{ij,t}^2 \cdot R_{ij} \right\} \quad (3.1)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^N P_i^G = \sum_{ij=1}^{N-1} I_{ij,t}^2 \cdot R_{ij} + \sum_{i=1}^N (P_i^D + PVE_i^D) \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_i^G = \sum_{ij=1}^{N-1} I_{ij,t}^2 \cdot X_{ij} + \sum_{i=1}^N Q_i^D \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \leq \bar{K} \quad (3.4)$$

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (3.5)$$

$$|I_{ij,t}| \leq I_{ij}^{\max} \quad (3.6)$$

$$0 \leq P_i^G \leq P_{G,i}^{\max} \quad (3.7)$$

$$0 \leq Q_i^G \leq Q_{G,i}^{\max} \quad (3.8)$$

$$0 \leq PEV_i^D \leq P_{carga,i}^{nom} \quad (3.9)$$

$$\{V_{i,t}, I_{ij,t}, P_i^G, Q_i^G, P_i^D, Q_i^D, PVE_i^D\} \in \mathbb{R} \quad (3.10)$$

$$k = \{S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_n\} \quad (3.11)$$

$$\alpha_i \in \{0,1\} \quad (3.12)$$

Las restricciones del numeral (3.2) a (3.3) corresponden al sistema de distribución, la restricción (3.2) presenta el balance de potencia activa incluyendo la estación de carga de VE y la restricción (3.3) el balance de potencia reactiva. La restricción (3.4) especifica que la cantidad de reguladores instalados sea menor al máximo de reguladores establecidos. Las restricciones (3.5) a (3.9) especifican las restricciones técnicas de balance de potencia activa y reactiva, caída de tensión, límites de tensión, límites de corriente y potencia máxima del punto de carga del VE. Finalmente, las ecuaciones (3.10) a (3.12) muestran la naturaleza de cada variable.

#### 4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS SOBRE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos al desarrollar el modelo matemático planteado en el capítulo 3. Para este se tiene seis casos diferentes para la respuesta del AG para dar una comparativa de la respuesta que se obtuvo, finalmente se presenta un caso final en el que se muestra el perfil de tensión y pérdidas que se obtienen con el modelo propuesto.

Ahora, para apreciar mejor el avance el proyecto, se presentarán los resultados de la siguiente manera. Se presentarán los casos mencionados anteriormente, acompañados de una tabla que presenta el valor de la incumbente y los nodos propuestos.

Al igual, para las pruebas realizadas, es relevante tener en cuenta que una tasa de mutación muy pequeña puede conducir a la deriva genética, así mismo, una tasa de recombinación que es demasiado alta puede conducir a la convergencia prematura del AG. Y una tasa de mutación demasiado alta puede conllevar a la pérdida de buenas soluciones, es por esto por lo que se realizó diferentes pruebas encontrando un ajuste razonable para el problema que se está trabajando para el caso final, que es una tasa de recombinación del 80% y una tasa de mutación del 30%.

En primer lugar, se presenta el primer caso en el que se obtuvo un valor para el menor costo en reguladores de tensión en un periodo anual de \$3.760.410.971 con un total de 116 iteraciones. La ubicación del regulador y los nodos donde los ubica se presenta en la Tabla 4 en el que 0 indica que no se instala regulador en el nodo y 1 que si lo instala.

Tabla 4. Solución obtenida para el caso 1 para la ubicación de reguladores de tensión.

Nodo	Regulador de tensión
2	1
3	1
10	0
31	0

Por otra parte, se presenta el segundo caso en el que obtuvo un valor para el costo de reguladores de tensión de \$3.750.045.914 en un año con un total de 68 iteraciones, se puede observar que para esta solución se obtiene una respuesta mejor que para el primer caso ya que presenta un menor costo y ubica reguladores de tensión en todos los nodos propuestos,



esto debido a que se modificó la tasa de mutación esperando obtener una mejor respuesta. La ubicación del regulador y los nodos donde los ubica se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Solución obtenida para el caso 2 para la ubicación de reguladores de tensión.

Nodo	Regulador de tensión
2	1
3	1
26	1
33	1

Posteriormente, se presenta el tercer caso en el que se obtuvo un valor en la incumbente de \$3.685.762.775 con un total de 62 iteraciones. La diferencia que se puede obtener respecto al segundo caso es que, hay mejoras en el costo debido a que presenta una solución menor, pero considerando que no ubica un regulador de tensión en un nodo como se puede observar en la Tabla 6, es por esto por lo que se optó para casos posteriores, aumentar el número de iteraciones para observar la respuesta de la función objetivo.

Tabla 6. Solución obtenida para el caso 3 para la ubicación de reguladores de tensión.

Nodo	Regulador de tensión
2	1
3	1
5	1
22	0

En cuarto lugar, se presenta el cuarto caso en el que se obtuvo un valor para el menor costo en reguladores de tensión en un periodo anual de \$3.755.944.385 con un total de 119 iteraciones. Este valor respecto a casos anteriores no es favorable ya que no es el menor valor y esto es debido a que la tasa de mutación para este caso fue muy pequeña y así mismo no se ubican reguladores de tensión en todos los nodos propuestos. La ubicación del regulador y los nodos donde los ubica se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Solución obtenida para el caso 4 para la ubicación de reguladores de tensión.

Nodo	Regulador de tensión
3	1
4	1
5	1
12	0

Seguido a esto, se presenta el quinto caso en el cual se volvió a optar por disminuir el número de iteraciones las cuales fueron 75 en el que se obtuvo una respuesta para la incumbente de \$3.725.294.524 en un año para los reguladores de tensión. Esta respuesta permitió dar dos soluciones para el caso posterior, aumentar la tasa de mutación y el número de repeticiones para que converja el AG ya que según la Tabla 8 sigue sin ubicar un regulador de tensión en nodos lejanos al sistema.

Tabla 8. Solución obtenida para el caso 5 para la ubicación de reguladores de tensión.

Nodo	Regulador de tensión
2	1
3	1
6	1
14	0

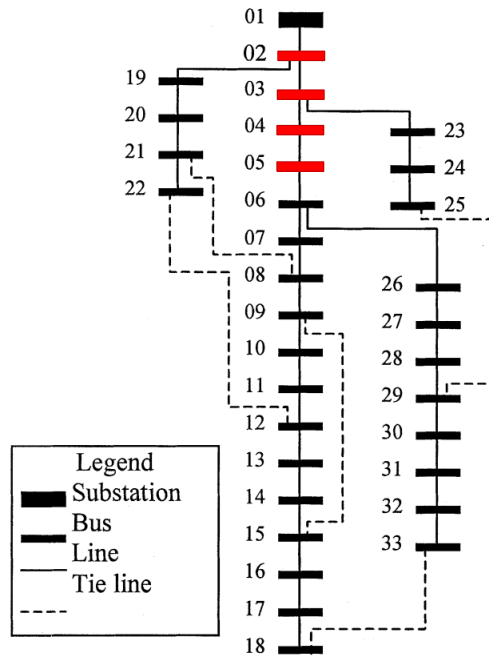
Finalmente, para el caso final se realizaron 5000 iteraciones y también se dejó el valor en el que debe repetirse la respuesta en 5000, para así garantizar que el sistema no alcance la convergencia y con esto comprobar si se alcanza o no una evolución en la respuesta. Adicional a esto, es importante recordar lo mencionado al inicio del capítulo respecto a las tasas de recombinación y mutación para este caso. El resultado obtenido presenta un valor en la incumbente de \$3.597.264.581 en un periodo anual. Así mismo en la Tabla 9 y en la Figura 8 se presenta los nodos obtenidos por el sistema en donde se debe ubicar el regulador de tensión, en la figura se presenta como los recuadros en color rojo.

Para este se puede observar según la topología de la red que los nodos donde ubica los reguladores de tensión son en los nodos de bifurcación. Así mismo como dato adicional la respuesta obtenida por la función objetivo a partir de la iteración 930 presenta el mismo costo de inversión en reguladores de tensión, este dato se podrá visualizar más adelante cuando se presente la optimización de la función objetivo con el algoritmo genético.

Tabla 9. Solución obtenida para el caso final para la ubicación de reguladores de tensión.

Nodo	Regulador de tensión
2	1
3	1
4	1
5	1

Figura 8. Ubicación de reguladores de tensión en el circuito, caso final.



Fuente: Modificada de (Venkatesh, Ranjan, & Gooi, 2004).

Por consiguiente, se desea observar la respuesta obtenida con respecto al perfil de tensión y las pérdidas en el sistema, para esto se estableció una hora pico a observar la cual corresponde a las 19:00 horas y adicional a esto, a modo de comparativa, se presentan los resultados cuando se presentan reguladores de tensión en la red y cuando no se presentan.

Figura 9. Perfil de tensión sin considerar la ubicación de reguladores de tensión.

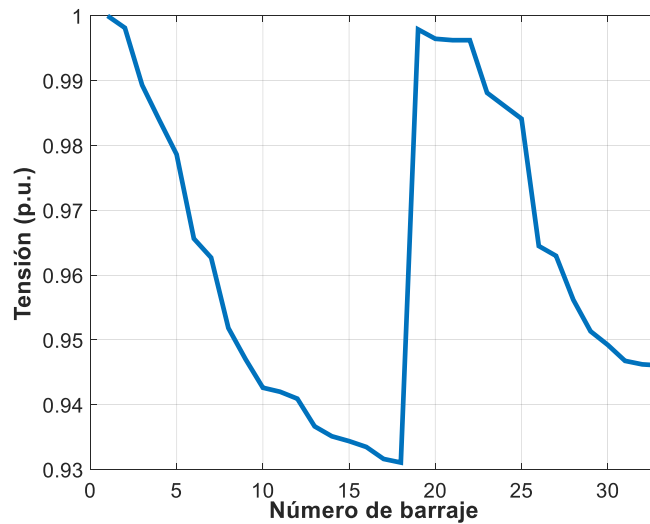
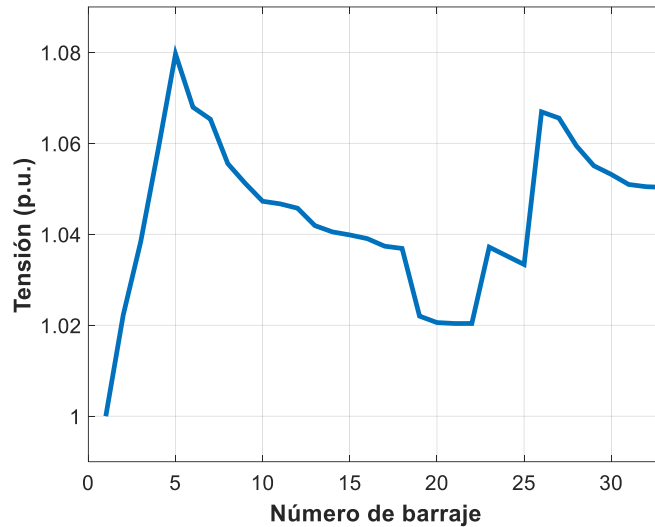


Figura 10. Perfil de tensión considerando reguladores de tensión en hora pico (19:00) en los nodos de la Figura 8.



De la misma forma se presentan las pérdidas en el sistema, para observar las pérdidas de una manera más sencilla, se presenta la gráfica en función del número de ramales los cuales tendrán una codificación consecutiva, se tendrá en cuenta el orden de los nodos de envío y recibo de la Tabla A.1 para los ramales.

Es importante tener en cuenta que cuando no se instalan reguladores de tensión las pérdidas totales en la red son en potencia activa 92 kW y potencia reactiva 60 kVAr. En cambio, con la inclusión de reguladores ese valor de potencia activa y reactiva ahora es, 80 kW y 80 kVAr, respectivamente.

Figura 11. Pérdidas en la red sin considerar la ubicación de reguladores de tensión.

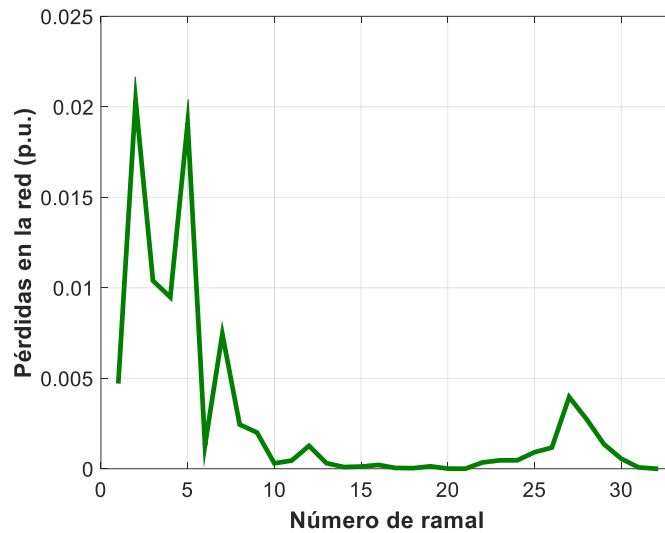
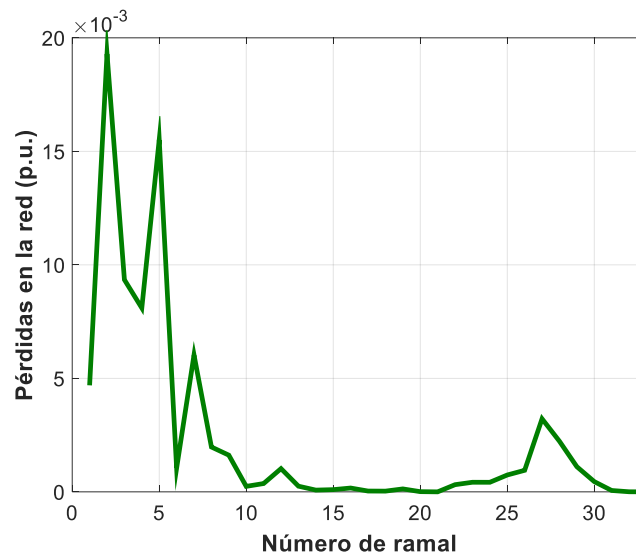
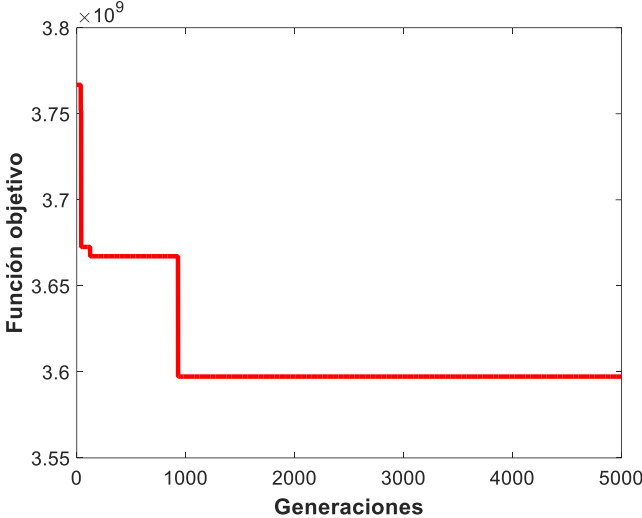


Figura 12. Pérdidas en la red considerando reguladores de tensión en hora pico (19:00) en los nodos de la Figura 8.



En la Figura 13 se muestra el comportamiento del algoritmo genético; en el eje independiente se presenta las generaciones (iteraciones) y en el eje dependiente está ubicada la función objetivo, los puntos de color rojo representan el mejor valor de cada generación. En este podemos notar que en la primera generación que se obtiene de forma aleatoria, da un valor a la función objetivo alto. Para las siguientes generaciones se puede ver como los resultados van mejorando en la función objetivo, la búsqueda del valor óptima continúa hasta que se cumple el criterio de parada, para este caso el algoritmo se detiene por el límite de repeticiones y de iteraciones que se había definido.

Figura 13. Optimización de la función objetivo con el algoritmo genético.



## **5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

### **5.1 Conclusiones generales**

Inicialmente, el modelo de optimización propuesto permitió cuantificar el impacto de la inclusión de puntos de carga vehículos eléctricos por medio de reguladores de tensión en el flujo de potencia, perfiles de tensión, pérdidas en los ramales, pérdidas totales del sistema y también, ganancias del operador de red en el sistema radial propuesto. Mostrando así de manera clara que efectivamente ante la inclusión de los VE en el sistema dichos parámetros son las características más afectadas, como se presenta finalmente en el caso final. En donde el flujo de potencia y el perfil de tensión tiene una variación considerable en la hora pico definida para el modelo propuesto.

Adicional a esto, el modelo matemático propuesto permitió encontrar la ubicación en los nodos del sistema de distribución radial donde se ubicaría los reguladores de tensión teniendo en consideración factores tales como, costos, distribución de los reguladores de tensión y límites operativos de la red de distribución, permitiendo así a operadores de red tener un punto de referencia de buena calidad para el planeamiento y análisis de las redes. Esta metodología queda a disposición del operador de red para estudiar el impacto de la inclusión de estaciones de carga de vehículos eléctricos en la red.

De igual manera, los resultados obtenidos presentados en la sección 4, muestran que el algoritmo genético aplicado a problemas de localización ofrece resultados de buena calidad ya que se logran minimizar los costos operacionales y de inversión que implican agregar los reguladores de tensión en el sistema de distribución.

Finalmente, la Figura 10 permite observar cómo el perfil de tensión subió considerablemente con respecto al perfil original de la Figura 9, esta mejora en el perfil de tensión justifica la elección el AG en ubicar los reguladores en los nodos de bifurcación 2, 3, 4 y 5 ya que son los nodos más cercanos a la fuente y así mismo disminuye considerablemente el valor de las pérdidas como se pudo notar en la Figura 12.

### **5.2 Recomendaciones**

Se sugiere en primera instancia involucrar precios más reales en los costos de los reguladores de tensión y que también se encuentren acorde a la época en la que se realiza el estudio para que no se presenten desequilibrios en la respuesta obtenida.

También se puede plantear una restricción de cercanía en los reguladores con una penalidad asociada a distancia entre nodos en los puntos donde ubica el regulador el AG y así no queden nodos adyacentes y observar y analizar el tipo de respuesta que se obtenga con tal restricción.

De la misma forma, como última recomendación se buscaría trabajar con un sistema de prueba libre que incluya vehículos eléctricos ya que ayudaría mucho más al estudio en el área de estos a la hora de realizar comparativos y observar diferentes comportamientos del sistema dependiendo del fin que se desea analizar.

### **5.3 Trabajo futuro**

Para trabajos futuros, se recomienda que al ser un problema de optimización el cual siempre busca obtener una solución óptima para el modelo que se plantea, se considere las restricciones presentadas en el apartado anteriores de recomendaciones, esto permitiría buscar una solución óptima teniendo en cuenta más consideraciones en el análisis y permitiendo observar que nodos pueden ser los más ideales para la ubicación de los reguladores de tensión.

Igualmente, en ciertos análisis en sistemas de distribución no necesariamente se utilizan flujos de carga, sino también análisis estadísticos y probabilísticos con el fin de inferir aspectos importantes como mejorar la inserción de vehículos eléctricos a la red, cargabilidad en los elementos y futuras expansiones que se tengan planeadas en los sistemas de distribución. Es así que como oportunidad se presenta integrar algunas de las probabilidades que se ajustan al caso estudiado junto con el flujo de carga, con el fin de determinar aspectos como cargabilidad y confiabilidad en el sistema de distribución.



## 6. REFERENCIAS

- Agostini, M., Bignucolo, F., Coppo, M., Turri, R., & Schwidtal, J. (2019). Ancillary services provision by aggregators and impact on distribution network operation. *54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Bucharest, Romania: IEEE. doi:10.1109/UPEC.2019.8893612
- Alame, D., Azzouz, M., & Kar, N. (2020). Assessing and Mitigating Impacts of Electric Vehicle Harmonic Currents on Distribution Systems. *Energies*, *13*(12), 3257-3274. doi:10.3390/en13123257
- Asamer, J., Reinthaler, M., Ruthmair, M., Straub, M., & Puchinger, J. (Marzo de 2016). Optimizing charging station locations for urban taxi providers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *85*, 233-246. doi:10.1016/j.tra.2016.01.014
- Gallego, R., Escobar, A., & Toro, E. (2008). *Algoritmo genético: Técnicas Metaheurísticas de optimización* (2a ed.). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gong, L., Cao, W., & Zhao, J. (2017). Load modeling method for EV charging stations based on trip chain. *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (págs. 1-5). Beijing, China: IEEE. doi:10.1109/EI2.2017.8245572
- Hodgson, M. J. (Julio de 1990). A flow-capturing location-allocation model. *Geographical Analysis*, *22*(3), 270-279. doi:10.1111/j.1538-4632.1990.tb00210.x
- Ip, A., Fong, S., & Liu, E. (2010). Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering. *6th International Conference on Advanced Information Management and Service (IMS)* (págs. 460-465). Seoul, South Korea: IEEE.
- Liu, J. (Noviembre de 2012). Electric vehicle charging infrastructure assignment and power grid impacts assessment in Beijing. *Energy Policy*, *51*, 544-557. doi:10.1016/j.enpol.2012.08.074
- Marcincin, O., Medvec, Z., & Moldrik, P. (2017). The impact of electric vehicles on distribution network. *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* (págs. 1-5). Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE. doi:10.1109/EPE.2017.7967344
- Ramírez, S. (2004). *Redes de distribución de energía*. Manizales: Editorial de la Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/3393/>
- Rosso, Á. (2010). *Evaluación del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución*. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid, España: B.Sc. Tesis, Departamento de Ingeniería Industrial, Escuela Técnica de Ingeniería.
- Sadegui, P., Rajabi, A., & Kazemi, H. (15 de Julio de 2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, *125*, 289-299. doi:10.1016/j.apenergy.2014.03.077

- Upchurch, C., Kuby, M., & Lim, S. (Enero de 2009). A model for location of capacitated alternative-fuel stations. *Geographical Analysis*, 41(1), págs. 85-106. doi:10.1111/j.1538-4632.2009.00744.x
- UPME. (2017). *Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2017-2031*. Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/Energia\\_electrica/Plan\\_GT\\_2017\\_2031\\_PREL.pdf](https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Plan_GT_2017_2031_PREL.pdf)
- Venkatesh, B., Ranjan, R., & Gooi, H. (Febrero de 2004). Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 260-266. doi:10.1109/TPWRS.2003.818739
- Xie, W., & Luan, W. (2011). Modeling and simulation of public EV charging station with power storage system. *International Conference on Electric Information and Control Engineering* (págs. 2346-2350). Wuhan, China: IEEE. doi:10.1109/ICEICE.2011.5776823
- XM. (2020). *XM. Históricos de Demanda*. Recuperado el 15 de Julio de 2020, de Informes de demanda: <https://www.xm.com.co/Paginas/Consumo/historico-de-demanda.aspx>

## ANEXO A: INFORMACIÓN SOBRE EL SISTEMA DE PRUEBA

### A.1 Sistema IEEE de 33 nodos

La Tabla A.1 muestra los datos del sistema de prueba, tales como los parámetros de las líneas y la demanda de cada nodo, donde las demandas están asociadas al nodo de recibo.

Tabla A.1. Información de tramos de red y demanda para el sistema de prueba.

Nodo $i$	Nodo $j$	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ij}$ [ $\Omega$ ]	$P_i^D$ [kW]	$Q_i^D$ [kVAr]
1	2	0,0922	0,0477	100	60
2	3	0,4930	0,2511	90	40
3	4	0,3660	0,1864	120	80
4	5	0,3811	0,1941	60	30
5	6	0,8190	0,7070	60	20
6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	8	0,7114	0,2351	200	100
8	9	1,0300	0,7400	60	20
9	10	1,0400	0,7400	60	20
10	11	0,1966	0,0650	45	30
11	12	0,3744	0,1238	60	35
12	13	1,4680	1,1550	60	35
13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	15	0,5910	0,5260	60	10
15	16	0,7463	0,5450	60	20
16	17	1,2890	1,7210	60	20
17	18	0,7320	0,5740	90	40
2	19	0,1640	0,1565	90	40
19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	22	0,7089	0,9373	90	40
3	23	0,4512	0,3083	90	50
23	24	0,8980	0,7091	420	200
24	25	0,8960	0,7011	420	200
6	26	0,2030	0,1034	60	25
26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	28	1,0590	0,9337	60	20
28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	31	0,9744	0,9630	150	70
31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	33	0,3410	0,5302	60	40

Fuente: Tomada de (Venkatesh, Ranjan, & Gooi, 2004).