

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE UNA ESTACIÓN DE RECARGA PÚBLICA PARA  
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA.**

**BRAYAN ALFONSO ARDILA PRADA  
YEISON JOHAN OCHOA VILLABONA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE UNA ESTACIÓN DE RECARGA PÚBLICA PARA  
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA.**

**BRAYAN ALFONSO ARDILA PRADA  
YEISON JOHAN OCHOA VILLABONA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista**

**Director**

**OSCAR ARNULFO QUIROGA QUIROGA  
Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica**

**Codirector**

**IVÁN DAVID SERNA SUÁREZ  
Magister en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

*Primeramente, a Dios,  
quien me ha dado fortaleza durante todo este camino.*

*A mí padre,  
Por ser mi mayor motivación para estudiar esta carrera y enseñarme a ser siempre fuerte  
en los momentos más difíciles.*

*A mí madre,  
Por darme el apoyo necesario en cada momento de mi vida y motivarme a ser cada día  
mejor persona con su ejemplo y dedicación.*

*A mis hermanos,  
Por estar pendientes y brindarme su apoyo incondicional en cada uno los pasos que voy  
recorriendo.*

*A María Fernanda,  
Por acompañarme y tenerme paciencia durante todo este camino, ayudándome siempre a  
levantarme en cada momento difícil.*

*A los amigos que eh conocido a lo largo de esta carrera,  
Por tan buenos momentos y risas, que me ayudaron a sacar una sonrisa en momentos  
difíciles.*

*A los profesores,  
Por ofrecer todo su conocimiento para formar mi carácter como profesional y enseñarme  
los valores necesarios para ser un buen ingeniero.*

**Brayan Alfonso Ardila Prada**

## DEDICATORIA

*A mí madre,*

*Por nunca rendirse y luchar sola para asegurarnos un futuro mejor, dándome la oportunidad de ser lo que ella siempre quiso para mí, este título es de ella.*

*A Juliana,*

*Por ser mi brazo derecho y mi apoyo en los momentos más difíciles de todo este proceso.*

*A manada de lobos,*

*Por siempre estar dispuestos a sacarme una sonrisa en las penurias que se viven en la universidad, momentos y conversaciones valiosas que ayudaron a formar mi carácter como persona, sé que siempre podré contar con ellos y ellos conmigo en lo que decidamos construir de ahora en adelante.*

*Enormes gracias,*

*A los profesores Oscar Quiroga y Gabriel Ordoñez por hacerme enamorar de mi carrera con su forma de transmitir los conocimientos que, sin duda, enriquecieron mi crecimiento como profesional.*

*Por último,*

*Dedico este proyecto al cuidado del medio ambiente y ojalá se empiecen a desarrollar proyectos en pro de la masificación de los vehículos eléctricos en el país.*

**Yeison Johan Ochoa Villabona**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	18
1. INFRAESTRUCTURA PARA LA GESTIÓN DE CARGA .....	20
1.1 NORMATIVA.....	20
1.2 IMPACTO DE LA CONEXIÓN DE VE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ..	21
1.3 ESTACIÓN DE RECARGA PROPUESTA .....	22
1.3.1 Características de la ERV .....	25
1.3.2 Conexión de la estación de recarga.....	26
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE UBICACIÓN ÓPTIMA Y SOLUCIÓN. ..	31
2.1 CASO DE ESTUDIO .....	31
2.1.1 Topología del SDEE .....	32
2.1.2 Zona de aplicación .....	34
2.2 MODELO MATEMÁTICO.....	35
2.2.1 Nomenclatura.....	36
2.2.2 Función objetivo.....	37
2.2.3 Restricciones .....	37
2.3 METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN.....	38
2.3.1 Codificación .....	39
2.3.2 Parámetros del modelo matemático .....	39
2.3.3 Costo del terreno ( $\Omega_i$ ).....	40
2.3.4 Costo de construcción ( $\beta$ ).....	40
2.3.5 Perdidas de potencia en el SDEE. ( $\Delta P$ ).....	40
2.4 ALGORITMO GENÉTICO.....	41
2.4.1 Población inicial .....	43

2.4.2 Conjunto de nodos candidatos ( <i>l</i> ) .....	43
2.4.3 Selección. ....	44
2.4.4 Cruce. ....	44
2.4.5 Mutación .....	45
2.4.6 Criterio de parada .....	45
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	46
4. CONCLUSIONES .....	57
5. TRABAJOS FUTUROS.....	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59
ANEXOS.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Vista de planta .....	23
Figura 2. Vista Exterior .....	24
Figura 3. Vista zona de recarga.....	24
Figura 4. Vista a la sala de espera.....	25
Figura 5. Esquema de conexión. ....	27
Figura 6. SDEE de 33 nodos utilizado como caso de estudio [10].....	32
Figura 7. Zona de aplicación.....	34
Figura 8. Codificación binaria.....	39
Figura 9. Diagrama del AG implementado.....	42
Figura 10. Ubicación de una ERV (nodo 1) para el caso 1 .....	48
Figura 11. Ubicación de una ERV (nodo 23) para el caso 2. ....	50
Figura 12. Valor de la función objetivo en cada generación para el caso 2. ....	51
Figura 13. Ubicación de tres ERV (nodo 16, 17 y 33) para el caso 3. ....	53
Figura 14. Valor de la función objetivo en cada generación para el caso 3. ....	53
Figura 15. Ubicación de tres ERV (nodo 18, 22 y 27) distribuidas por zonas, para el caso 4. ....	54
Figura 16. Valor de la función objetivo en cada generación para el caso 4. ....	55

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Presupuesto instalación eléctrica de la ERV.....	28
Tabla 2. Características del SDEE [10].....	32
Tabla 3. Distribución de los nodos por comunas. ....	35
Tabla 4. Precio del terreno en cada comuna. ....	40
Tabla 5. Caso 1 Método de búsqueda exhaustiva. ....	47
Tabla 6. Caso 2 Método de búsqueda exhaustiva. ....	49
Tabla 7. Tiempo estimado para encontrar la solución mediante la búsqueda exhaustiva.....	51
Tabla 8. Distribución de cada nodo óptimo en su zona. ....	55
Tabla 9. Resumen de los resultados.....	56

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Guía básica de uso para el Solver de algoritmos genéticos en MATLAB .....	62
ANEXO B. Función objetivo .....	68

## NOMENCLATURA

### SIGLAS

$VE$	:	Vehículo Eléctrico.
$SDEE$	:	Sistema de Distribución de Energía Eléctrica.
$ERV$	:	Estación de Recarga Publica de vehículos eléctricos.
$ESVE$	:	Equipo de suministro de vehículos eléctricos
$VCI$	:	Vehículo de Combustión interna

### CONJUNTOS

$N$	:	Conjunto de nodos del SDEE.
$I$	:	Conjunto de nodos candidatos a tener ERV.
$L$	:	Conjunto de líneas del SDEE.
$Z_1$	:	Conjunto de nodos localizados en la comuna 12
$Z_2$	:	Conjunto de nodos localizados en la comuna 3 y 13.
$Z_3$	:	Conjunto de nodos localizados en la comuna 6 y 15.

### VARIABLES

$V_{c_i}$	:	Ubicación de la ERV, donde toma el valor de 1 si hay estación y 0 en el caso opuesto.
$PN_n$	:	Ubicación de la ERV, donde toma el valor de 1 si hay estación y 0 en el caso opuesto.
$V_n$	:	Tensión en el nodo $n \in N$ .
$\delta_n$	:	Angulo de desfase en el nodo $n \in N$ .
$\Delta P$	:	Perdidas de potencia activa debidas a la ERV ubicada en el nodo $n \in N$ .

## PARÁMETROS

$\Omega_i$	:	Costo del terreno donde se ubicará la ERV en el nodo $i \in I$ .
$\beta$	:	Costo de construcción de una ERV en el nodo $i \in I$ .
$\alpha$	:	Costo de las pérdidas.
T	:	Periodo de tiempo en horas.
E	:	Capacidad de carga para la ERV en el nodo $i \in I$ .
$R_{mn}$	:	Resistencia de la línea $mn$ .
$X_{mn}$	:	Reactancia de la línea $mn$ .
$Z_{mn}$	:	Impedancia de la línea $mn$ .
$D_{mn}$	:	Distancia en km entre el tramo $mn$ .
$\Delta P_b$	:	Pérdidas totales sin tener en cuenta la ERV.
$\Delta P_T$	:	Pérdidas totales en el SDEE teniendo en cuenta la ERV.
$P_i$	:	Potencia activa eficaz en la barra $(P_{gen} - P_{carga})$ .
$Q_i$	:	Potencia reactiva eficaz en la barra $(Q_{gen} - Q_{carga})$ .

## GLOSARIO

**ALELO.** Es cada forma alternativa o posible valor que puede adoptar un mismo gen. Se puede distinguir entre los llamados alelos normales (heredados de padre o madre) o mutantes (han sufrido alguna alteración por la cual su valor a cambiado).

**COMPUTACIÓN EVOLUTIVA.** Es una rama de la inteligencia artificial, cuyo enfoque práctico es la solución de problemas de optimización combinatoria por medio de algoritmos inspirados en la teoría de evolución de Charles Darwin.

**CONVERGENCIA (OPTIMIZACIÓN).** Es la aparición de patrones en los resultados de una variable aleatoria según aumenta la muestra.

**CROMOSOMA.** Filamento condensado de ADN cuya cantidad es constante para cada especie animal o vegetal, en el cual se encuentra la mayoría de la información genética de un individuo.

**FENOTIPO.** Es cualquier característica observable de un individuo, como su fisiología y comportamiento. En otras palabras, es la expresión visible del potencial genético en función de un ambiente determinado.

**GEN.** Es una serie de nucleótidos que almacena información requerida para sintetizar moléculas con un rol celular específico. Conserva los datos e información biológica que se transmite y hereda a los descendientes.

**GENOTIPO.** Es el conjunto de información genética que poseen los seres biológicos, codificado en forma de ADN.

## RESUMEN

**TÍTULO:** UBICACIÓN ÓPTIMA DE UNA ESTACIÓN DE RECARGA PÚBLICA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA\*

**AUTORES:** BRAYAN ALFONSO ARDILA PRADA\*\*  
YEISON JOHAN OCHOA VILLABONA

**PALABRAS CLAVES:** Vehículo eléctrico, infraestructura de recarga, optimización, algoritmo genético.

### DESCRIPCIÓN

En este trabajo de grado se plantea una metodología que permite ubicar estaciones de recarga pública de vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica, para esto se tiene en cuenta el costo debido a la conexión de un punto de recarga, ya que puede ser considerable dependiendo del tipo de tecnología y capacidad de los módulos de recarga en las estaciones, además del precio del terreno y costos de operación de las estaciones de recarga. Por tal motivo, disminuir los costos de montaje y operación son primordiales, ya que permite que éstas sean viables económicamente. Para lograr lo anterior se plantea un caso de estudio donde se hace uso de una red tipo de la IEEE la cual cuenta con 33 nodos en media tensión, sobrepuesta en una zona de la ciudad de Bucaramanga con el fin de obtener valores reales del precio del terreno y donde se analizarán varios escenarios planteados, donde se las dará solución mediante la utilización del algoritmo genético cuando sea necesario y/o mediante búsqueda exhaustiva; permitiéndonos encontrar la ubicación óptima en cada una de las diferentes situaciones. Realizar esta metodología es de gran importancia, ya que la localización de una estación de recarga para vehículos eléctricos trae consigo altas exigencias al SDEE, la conexión de carga adicional en el sistema de potencia provoca caídas de tensión, sobrecarga en transformadores y aumento de las pérdidas en la red de distribución.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Codirector: Iván David Serna Suárez

## ABSTRACT

**TITLE:** OPTIMUM LOCATION OF A PUBLIC RECHARGE STATION FOR ELECTRIC VEHICLES IN AN ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION NETWORK\*

**AUTHORS:** BRAYAN ALFONSO ARDILA PRADA\*\*  
YEISON JOHAN OCHOA VILLABONA

**KEYWORDS:** Electric vehicle, charging infrastructure, charging stations.

### DESCRIPTION

In this degree work, a methodology is proposed that allows to locate public recharging stations of electric vehicles in an electric power distribution network, for this the cost due to the connection of a recharging point is taken into account, since it can be considerable depending on the type of technology and capacity of the recharge modules in the stations, in addition to the price of land and operating costs of charging stations. For this reason, reducing the costs of assembly and operation are paramount, since it allows them to be economically viable. To achieve the above, a case study is proposed where a network type of the IEEE is used which has 33 nodes in medium voltage, superimposed in an area of the city of Bucaramanga in order to obtain real values of the price of the terrain and where several scenarios will be analyzed, where they will be solved by using the genetic algorithm when necessary and / or by exhaustive search; allowing us to find the optimal location in each of the different situations. Carrying out this methodology is of great importance, since the location of a charging station for electric vehicles brings high demands to SDEE, the connection of additional load in the power system causes voltage drops, overload in transformers and increased losses in the distribution network.

---

\* Degree project

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Codirector: Ivan David Serna Suarez

## INTRODUCCIÓN

El costo de la infraestructura de recarga para los VE puede ser considerable dependiendo del tipo de tecnología y capacidad de los módulos de recarga en las estaciones, además del precio del terreno y costos de operación de las ERV. Por tal motivo, disminuir los costos de montaje y operación son primordiales, ya que permite que éstas sean viables económicamente. El objetivo es que los puntos de carga sean viables y se establezcan en el mercado colombiano con el propósito de incentivar la movilidad eléctrica, contribuyendo a la descarbonización y ayudando al crecimiento de la economía. Una gestión inteligente de la carga permitiría que personas naturales y jurídicas tengan la posibilidad de utilizar sus vehículos para entrar a competir en el mercado mediante un modelo de negocio que contemple la compra y venta de energía en un futuro.

En este trabajo de grado se plantea una metodología que permita ubicar una ERV en una red de distribución de energía eléctrica, minimizando el costo de operación por las pérdidas en el sistema y de inversión debido a su construcción, que son los parámetros más importantes para tener en cuenta al momento de ubicar la estación. Para lograr lo anterior se plantea un caso de estudio donde se hace uso de una red tipo de la IEEE la cual cuenta con 33 nodos en media tensión, sobrepuesta en una zona de la ciudad de Bucaramanga y donde se analizarán varios escenarios y se les dará solución mediante la utilización del algoritmo genético y/o mediante búsqueda exhaustiva; permitiéndonos encontrar la ubicación óptima en cada una de las diferentes situaciones. La localización de una estación de recarga para vehículos eléctricos trae consigo altas exigencias al SDEE, la conexión de carga adicional en el sistema de potencia provoca caídas de tensión, sobrecarga en transformadores y aumento de las pérdidas en la red.

El presente documento está constituido por 3 capítulos, los cuales se desarrollan de la siguiente manera: En el capítulo uno se presenta una propuesta de diseño para una estación de recarga pública la cual será necesaria para el desarrollo del problema, donde se tuvo en cuenta la capacidad de la red con el fin de no afectar su estabilidad. En el capítulo dos se expone el problema de optimización el cual consiste en ubicar estaciones de recarga en el sistema de distribución considerando el precio de construcción y pérdidas de potencia. Se plantea el modelo matemático, el cual contiene los parámetros más influyentes al momento de la conexión de puntos de recarga. Finalmente, en el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos al desarrollar varios escenarios con sus respectivos análisis y comparación entre los dos métodos de solución con el fin de hallar la ubicación óptima.

## **1. INFRAESTRUCTURA PARA LA GESTIÓN DE CARGA**

La presencia y el correcto funcionamiento de la infraestructura de recarga para los VE, se ha convertido en uno de los factores determinantes para llevar a esta tecnología de simples proyectos piloto a su comercialización y masificación. Este ha sido un concepto que se ha modificado desde que se empezó a utilizar, debido principalmente a que, en sus inicios la infraestructura de recarga de un VE no era más que un poste en superficie o wallbox (equipos en pared o columna). Las innovaciones tecnológicas junto con algunas definiciones reglamentarias y normativas han llevado a que la infraestructura de recarga evolucione, definiendo principalmente los aspectos relacionados con la seguridad de las personas y de los equipos. Como resultado, en el mercado se encuentra una amplia gama de elementos para reabastecer a los VE sin importar la estructura de recarga incorporada.<sup>1</sup>

### **1.1 NORMATIVA**

La infraestructura de recarga y los componentes de los VE están bajo estándares internacionales que buscan reducir los accidentes por la conexión del vehículo a la red eléctrica. La normativa internacional deberá adecuarse a las limitaciones técnicas de tal forma que se incentive la masificación de los VE sin afectar la calidad del servicio a los usuarios regulados y no regulados.

---

<sup>1</sup> RODRÍGUEZ, A. B. A. D. Melissa. Estudios sobre el desempeño de Vehículos Eléctricos Dependiendo de. Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana. 2015. p. 15

Los requerimientos de seguridad e instalación de las estaciones en los países desarrollados está regulada en su mayoría por el grupo de normas IEC TC64 (IEC 6140, IEC 62040, IEC 60529...) a su vez los componentes para la gestión de carga como postes y conectores debe cumplir la normativa IEC TC69(IEC 81851-1,IEC 61851-23,IEC 61851-3), los protocolos de comunicación entre el VE y la red para la gestión integral de la carga considera las normas ISO/IEC 15118 y la IEC 61851-24).Por último los parámetros de seguridad de las baterías está contemplado en el grupo de normar TC21X<sup>2</sup>. La normativa colombiana se limita a las normas IEC 61851-1 o Sección 625 de la NTC 2050, SAE J1772 e IEC 61851-1 para los conectores además de pruebas de laboratorio UL 2594, UL 2231, UL 991, UL 1998, UL 2251. (RETIE).

## **1.2 IMPACTO DE LA CONEXIÓN DE VE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN**

El costo del montaje de las estaciones de recarga y el impacto que estas tienen en el sistema de distribución son dos de los factores más importantes a tener en cuenta cuando se pretende la conexión de estaciones de recarga pública en la red de distribución. La conexión de las baterías a la red eléctrica trae consigo inconvenientes técnicos<sup>3</sup> que deben ser resueltos previo al montaje de las estaciones de recarga; el cambio de conductores de las líneas, aumento de la potencia de los transformadores y adecuación de la infraestructura en baja y media tensión, son algunas de las actividades previas que se deben realizar con el fin de dar estabilidad al sistema y asegurar la continuidad de la prestación del servicio de energía eléctrica.

---

<sup>2</sup> CIRCUTOR. Protecció i control de terres en la Recàrrega de Vehicles Elèctrics. Barcelona,España, 2017

<sup>3</sup> ENDESA, Vehículo Eléctrico. [En línea]. Disponible en: <https://endesavehiculoelectrico.com/recarga/tipos-de-recarga/>.

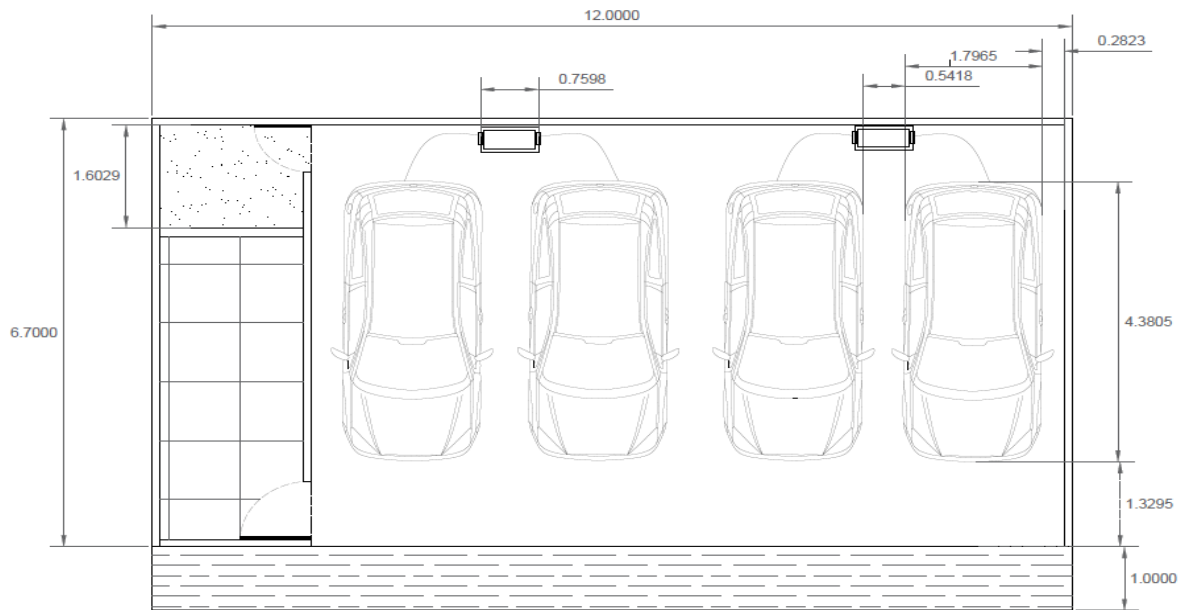
La gestión eficiente de la energía para la carga de las baterías y el uso óptimo de las redes de distribución disponibles son ejes de mejora primordiales si se quiere disminuir los costos de adecuación de la infraestructura eléctrica. La tensión en las barras del sistema y capacidad de transporte de potencia de las líneas de distribución deben ser analizadas cuidadosamente.

### **1.3 ESTACIÓN DE RECARGA PROPUESTA**

Las estaciones disponibles en el país están instaladas principalmente en zonas de alta concentración de personas como Universidades y estacionamientos de centros comerciales, lo que dificulta que las personas en general puedan acceder a la infraestructura de recarga fácilmente. En el presente proyecto se pone a consideración una estación diseñada, pensada en la comodidad de los usuarios y el buen funcionamiento del sistema de distribución. La estación cuenta con una zona en donde las personas pueden aprovechar el tiempo o simplemente esperar cómodamente la recarga del VE, además un cuarto eléctrico o de control de la estación y la zona dedicada a la carga de los VE.

En la figura 1 se muestra el plano de planta de la estación propuesta y el área necesaria para el cálculo del precio total del terreno para el montaje, parámetro requerido en la función objetivo del proyecto.

**Figura 0. Vista de planta**



En las figuras 2 - 5 se muestran las vistas generales realizadas en el software DIALux evo 7.1 de los espacios que conforman la estación la estación de recarga diseñada.

**Figura 2. Vista Exterior**



**Figura 3. Vista zona de recarga.**



**Figura 4. Vista a la sala de espera.**



**1.3.1 Características de la ERV.** La estación de recarga propuesta en el proyecto de grado considera un tipo de recarga semi-rápida como mejor alternativa a implementar en las ciudades de Colombia, considerando el estado actual de los sistemas de distribución regional y los inconvenientes técnicos que la conexión de estaciones de recarga rápida podrían provocar, afectando la confiabilidad y estabilidad del sistema. A continuación, se muestran algunas características eléctricas y capacidad de la estación:

**Capacidad de la estación:**

Cuenta con 2 postes de recarga cada uno de 22 kW para un total de 44 kW de potencia. Este valor se escogió de tal forma que causara el menor impacto en las redes y elementos en el sistema de potencia debido a los armónicos que aporta la naturaleza no lineal de la carga<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> ENDESA. Op. Cit.

**Tipo de carga:**

La estación se conecta a la red eléctrica mediante un transformador de 13,2/0,4 kV de 32 A dando la posibilidad de recargar una batería en 2-3 horas mediante la carga semi-rápida<sup>5</sup> dependiendo de la capacidad del VE y disponibilidad de la energía. Este tipo de carga esta principalmente enfocado para zonas públicas.

**Tipo de conector:**

El tipo de poste de recarga incluye con 2 conectores Tipo MENNEKES<sup>6</sup> para la carga de los vehículos eléctricos y se plantea que al menos uno de los postes tenga un conector tipo Shuko para recarga lenta de motos y bicicletas eléctricas, para un total de 4 vehículos máximo cargando simultáneamente.

**1.3.2 Conexión de la estación de recarga.** En el esquema de conexión de la figura 6 se muestran los componentes más importantes de una estación de recarga, toda estación de recarga debe tener por lo menos una protección diferencial por circuito o poste de recarga, un tablero de contadores, cuadro de mando, un SPL encargado de dar prioridad a la prestación del servicio aguas arriba de la estación y los postes de recarga. La acometida de la instalación se dimensiono para una ERV de hasta el doble de capacidad pensando en una futura expansión. El presupuesto para la acometida de esta estación se puede evidenciar en la tabla 1.

---

<sup>5</sup> E. UNIDAD N&E. Instalación de estaciones de carga para vehiculos eléctricos. 2016

<sup>6</sup> IBAÑEZ. Tipos de conectores, tipos de recarga y modos de carga. MOTOTORPASION, 2012.



**Tabla 0. Presupuesto instalación eléctrica de la ERV.**

PRESUPUESTO INSTALACIÓN ELÉCTRICA			
Descripción	Cantidad	Precio (\$)	Total
Canalización eléctrica formada por 2 tubos de polietileno de doble pared, Diámetro de 110 mm, alambre guía galvanizado, cinta de señalización, excavación en zanja, protección con hormigón, relleno y compactación del resto de la zanja con tierras saneadas. Instalada. <a href="http://www.sot.es/docs/tarifa/k.pdf">http://www.sot.es/docs/tarifa/k.pdf</a>	15 m	170.000	2.550.000
Canalización eléctrica para conexión poste de recarga 0,4x0,4 m formada por 2 tubo de PVC 90 mm diámetro, incluido dado de hormigón de 0,23x0,23 m, alambre guía colocado, cinta de señalización puestos en zanja de acometida.	15 m	50.000	750.000
Pavimento de loseta hidráulica de 25x25 cm, gris, recibido con mortero 1:6 de cemento y arena, incluso atezado de hormigón aligerado de 10 cm de espesor, rejuntado y limpieza. <a href="http://www.eiros.es/UserFiles/eiros/pdf/tarifas/28%20baldosa.pdf">http://www.eiros.es/UserFiles/eiros/pdf/tarifas/28%20baldosa.pdf</a>	50 m <sup>2</sup>	84200	4.210.000
Arqueta de registro tipo A-3, para conexionado de electricidad en exteriores, excavación en zanja, realizada con bloque hueco de hormigón vibrado de 9x25x50 cm, enfoscada y bruñida interiormente, de 958x702 mm y profundidad de 700mm, soporte para conductores, con fondo de arena, tapa y marco de hierro fundido normalizada (tipo A-3) de 750x1000 mm, montado sobre losa de hormigón armado de 15 cm de espesor. Totalmente ejecutada y acabada. <a href="https://www.laobra.es/cajas-registros/arquetas-pvc/">https://www.laobra.es/cajas-registros/arquetas-pvc/</a>	Und	750.000	1.500.000
Línea de distribución eléctrica subterránea cuádruplex 600 V (3 fase + neutro) AWG # 4 por fase 75 A de capacidad de conducción. Conductor de tierra incluido. <a href="http://www.procables.com.co/downloads/procables_catalogoproductos_2014_web.pdf">http://www.procables.com.co/downloads/procables_catalogoproductos_2014_web.pdf</a>	17 m	15.000	255.753

PRESUPUESTO INSTALACIÓN ELÉCTRICA			
Descripción	Cantidad	Precio (\$)	Total
Transformador de tensión 100 kVA 13.2/0.4 Kv+ 10 metros Línea de distribución tripolar aislada aérea # 8. Aguas arriba del transformador, tensión de operación 13.2-16 Kv. Instalado y puesto en funcionamiento. <a href="http://www.colombia.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Centros_de_transformacion/Transformador_en_bano_de_aceite_0_2.html">http://www.colombia.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Centros_de_transformacion/Transformador_en_bano_de_aceite_0_2.html</a>	Und	1	12.625.379
Hornacina de hormigón para ubicar la caja general de protecciones y equipos de medida de energía eléctrica. Totalmente terminada y con acabados.	Und	500.000	500.000
Armario de distribución y protecciones de poliéster, Sistema G IP55 de doble aislamiento, dimensiones 1530x600x174 mm, portafusiles BUC bornes de entrada y salida, fusibles NH-1 de 250 A, instalada en hornacina existente, incluso conexión de cableado hasta 240 mm². <a href="https://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-tecnicas-ecostruxure/Pedro-Cediel/Prisma-Plus.pdf">https://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-tecnicas-ecostruxure/Pedro-Cediel/Prisma-Plus.pdf</a>	Und	680.540	680.540
Interruptor(x2) DPX <sup>3</sup> 16-160 A, 380/415 V~ 50kVA de corte. Interruptor diferencialDX <sup>3</sup> tipo A, 4 polos, 400 Vac. Detectan fallas a tierra en las instalaciones de AC y DC protegidas. <a href="https://www.legrand.com.co/images/folletos/Lista-de-precios-industrial-2017-2018.pdf">https://www.legrand.com.co/images/folletos/Lista-de-precios-industrial-2017-2018.pdf</a>	Und	523.000	1.046.000
Medidor digital de potencia iEM 3100 Schneider Electric, LCD 95mm x 90mm, 10 Dígitos, 3 Fases,277/480 V ac (50/60 Hz) 63 A, instalado en hornacina Y armario de distribución existente. <a href="https://www.legrand.com.co/images/folletos/Lista-de-precios-industrial-2017-2018.pdf">https://www.legrand.com.co/images/folletos/Lista-de-precios-industrial-2017-2018.pdf</a>	Und	1.239.000	1.239.000

**PRESUPUESTO INSTALACIÓN ELÉCTRICA**

Descripción	Cantidad	Precio (\$)	Total
Poste de recarga EVlink parking IP 54. Modo de carga 2 o 3 de 22kW trifásico a 220/400V y 32 amperios. Control de acceso a carga mediante tarjeta RFID o aplicación web y registro de energía consumida. Protegido con sobretensiones, magneto térmico y diferencial con rearmes automáticos., incluso pintura de plaza, Información de funcionamiento mediante indicador luminoso. Comunicación mediante cable ethernet, FTP.SMTP o HTTP para envío y recuperación de datos. <a href="http://documentos.hibridosyelectricos.com/Catalogos/Schneider/EVLink-Parking.pdf">http://documentos.hibridosyelectricos.com/Catalogos/Schneider/EVLink-Parking.pdf</a>	Und	10.522.830	21.045.660
<b>TOTAL</b>			<b>46.114.812</b>

## **2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE UBICACIÓN ÓPTIMA Y SOLUCIÓN.**

Haciendo referencia al título de este trabajo, el problema de optimización consiste en ubicar una ERV en una red de distribución de energía eléctrica, con el fin de minimizar el costo de operación por las pérdidas en el sistema y de inversión debido a su construcción, que son los parámetros más importantes para tener en cuenta al momento de ubicar la estación. Para lograr lo anterior se trabaja sobre un caso de estudio base, donde se analizarán varios escenarios y se les dará solución mediante la implementación de un algoritmo genético que nos permita encontrar la ubicación óptima en cada una de las diferentes situaciones.

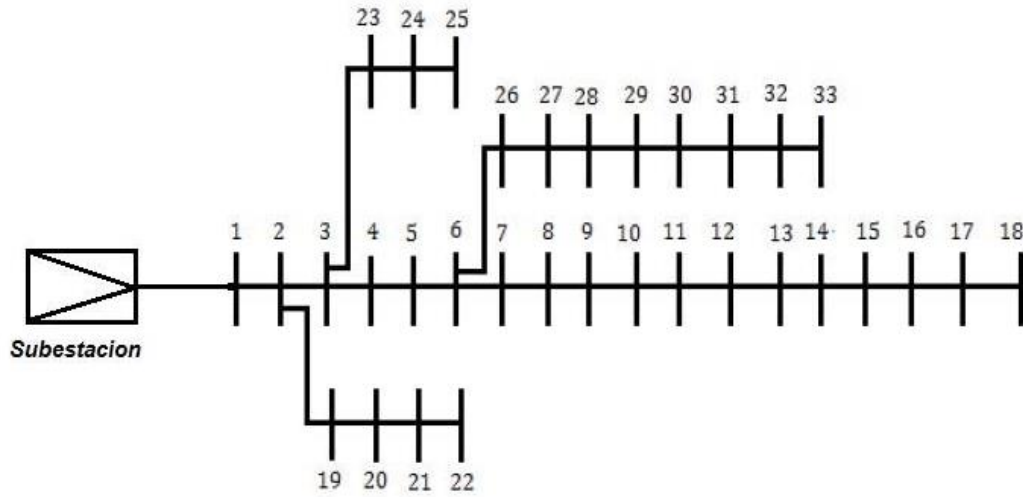
Darle solución a este problema tiene gran importancia ya que ubicar una ERV sin un análisis óptimo, no garantizaría que el costo de inversión y operación sea el mínimo lo cual puede disminuir la rentabilidad de las estaciones para el operador de red.

### **2.1 CASO DE ESTUDIO**

En esta sección se presentará el SDEE (ver Figura 6) que se utilizó como caso de estudio, con sus respectivas características y además la zona geográfica donde estará localizada la red, con el fin de presentar un caso de estudio más real.

**2.1.1 Topología del SDEE.** Los datos del SDEE, representado en la Figura 6, fueron tomados de una red de distribución tipo de media tensión<sup>7</sup>, la cual será utilizada como caso de estudio y presenta las siguientes características:

**Figura 6. SDEE de 33 nodos utilizado como caso de estudio [10].**



**Tabla 2. Características del SDEE [10].**

Line No	From Bus	To Bus	R $\Omega$	X $\Omega$	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	0,3660	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

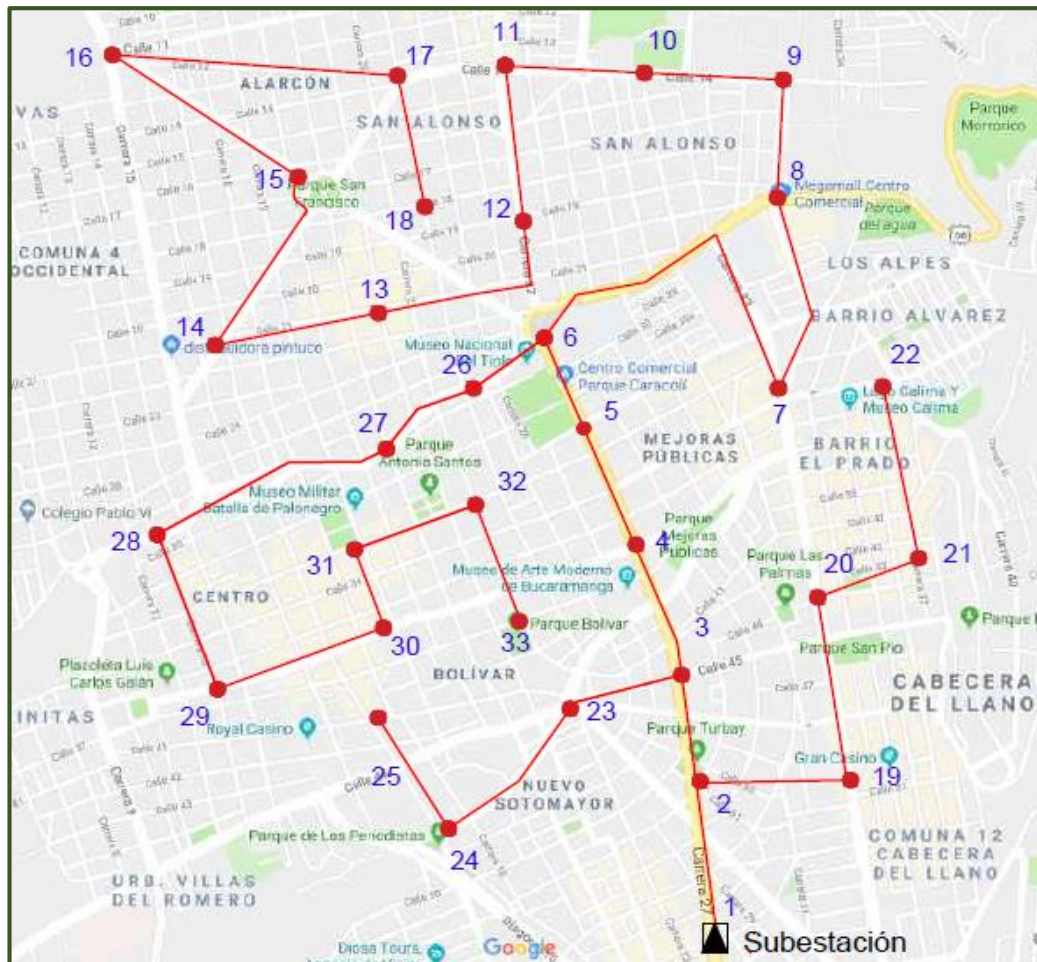
<sup>7</sup> TORO, R. X. L. Reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica basada en optimización de mapeo media-varianza, Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2014

Line No	From Bus	To Bus	R $\Omega$	X $\Omega$	R pu	X pu	Load Receiving End Bus	
							Real Power Load (kW)	Reactive Power Load (kVAR)
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	0,0004	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

La Tabla 2 muestra las siguientes características de la red: potencia de la carga en los nodos, resistencia y reactancia de cada uno de los tramos con sus valores en por unidad, con las siguientes bases:  $S_{base} = 1MVA$  y  $V_{base} = 12,66kV$ .

**2.1.2 Zona de aplicación.** Para un mejor análisis del problema presentado se acoplará el SDEE en estudio a una zona geográfica, con el fin de tener información acerca del costo del terreno el cual es una variable que influye en la ubicación de una ERV.

**Figura 7. Zona de aplicación.**



La zona de la *figura 7* está localizada en las comunas 3,6,12,13 y 15 de la ciudad de Bucaramanga en la cual están distribuidos los nodos del SDEE como se muestra en la *tabla 3*.

**Tabla 3. Distribución de los nodos por comunas.**

ZONA	COMUNAS	Nodos
1	Comuna 12	1,2,3,4,7,19,20,21 y 22
2	Comuna 3	12,13,14,15,16,17y 18
	Comuna 13	5,6,8,9,10 y 11
3	Comuna 6	23,24,25 y 33
	Comuna 15	26,27,28,29,30,31 y 32

## 2.2 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático planteado satisface las siguientes consideraciones:

- Las pérdidas de potencia ocasionadas por una ERV en el SDEE llevada a 1 año de operación.
- El costo de construcción de una estación de recarga, teniendo en cuenta el valor del terreno donde estará localizada.
- Límites de potencia en cada nodo con el fin de no sobrecargar la carga en cada nodo del sistema de distribución.
- Límites de tensión en cada nodo para garantizar que la caída de tensión no sobrepase los límites establecidos.
- Mínimo número de ERV a ubicar en el SDEE, para forzar al algoritmo a localizar al menos una estación y así no obtener una solución nula.

- Distribución de las ERV en las zonas de la red, garantizando que queden repartidas de una manera viable sobre toda la zona de aplicación.

### 2.2.1 Nomenclatura

#### CONJUNTOS

$N$	:	Conjunto de nodos del SDEE.
$I$	:	Conjunto de nodos candidatos a tener ERV.
$L$	:	Conjunto de líneas del SDEE.
$Z_1$	:	Conjunto de nodos localizados en la comuna 12
$Z_2$	:	Conjunto de nodos localizados en la comuna 3 y 13.
$Z_3$	:	Conjunto de nodos localizados en la comuna 6 y 15.

#### VARIABLES

$V_{c_i}$	:	Ubicación de la ERV, donde toma el valor de 1 si hay estación y 0 en el caso opuesto.
$V_n$	:	Tensión en el nodo $n \in N$ .
$\delta_n$	:	Angulo de desfase en el nodo $n \in N$ .
$\Delta P$	:	Perdidas de potencia activa debidas a la conexión de una ERV ubicada en el nodo $n \in N$ .

#### PARÁMETROS

$\Omega_i$	:	Costo del terreno donde se ubicará la ERV en el nodo $i \in I$ .
$\beta$	:	Costo de construcción de una ERV en el nodo $i \in I$ .
$\alpha$	:	Costo de las perdidas.
$T$	:	Periodo de tiempo en horas.
$E$	:	Capacidad de carga para la ERV en el nodo $i \in I$ .
$\Delta P_b$	:	Pérdidas totales sin tener en cuenta la ERV.
$\Delta P_T$	:	Pérdidas totales en el SDEE teniendo en cuenta la ERV.

### 2.2.2 Función objetivo

$$\min U = \alpha \cdot T \sum_{mn \in L} \Delta P + \sum_{i \in I} Vc_i (\Omega_i + \beta) \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 corresponde a la función objetivo del problema de optimización la cual consiste en minimizar dos términos. El primero, es el costo de operación de una ERV, donde  $\Delta P$  son las pérdidas de potencia activa debidas a la conexión de ERV en un periodo de tiempo  $T$  de un año y  $\alpha$  es el costo de las perdidas en pesos. El segundo término hace referencia al costo de inversión, donde  $Vc_i$  es la variable de decisión binaria, que indica si hay una ERV(1) o si no la hay (0),  $\Omega_i$  es el precio del terreno en cada nodo del SDDE y  $\beta$  es el costo de montaje de la ERV diseñada en el capítulo anterior.

**2.2.3 Restricciones.** Para cumplir con las consideraciones del modelo matemático es necesario plantear las restricciones mostradas a continuación:

$$\Delta P = \Delta P_T - \Delta P_b \quad (2.1)$$

$$S_n \leq S_n^{\max} \quad \forall n \in N \quad (2.2)$$

$$V_{\min} \leq V_n \leq V_{\max} \quad \forall n \in N \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in I} Vc_i \geq M \quad \forall i \in I \quad (2.4)$$

$$\sum Z_x = M \quad \forall x \in \{1,2,3\} \quad (2.5)$$

$$Vc_i \in \{0,1\} \quad (2.6)$$

$$S_n \in \square \quad (2.7)$$

$$V_n \in \square \quad (2.8)$$

La ecuación (2.2) aclara que las pérdidas de potencia activa debidas a una ERV son la diferencia entre las pérdidas teniendo en cuenta la conexión de las estaciones ( $\Delta P_T$ ) y las pérdidas totales del SDEE sin la ERV ( $\Delta P_b$ ).

La restricción (2.3) representa el límite de potencia máximo en cada nodo el cual para este trabajo es de 400 kW La ecuación (2.4) nos garantiza que la caída de tensión en cada nodo de la red de distribución no sobrepase el 10%.

Las ecuaciones (2.5) y (2.6) son restricciones de cantidad de ERV, en (2.5) se indica el número de ERV ( $M$ ) a ubicar en el SDEE y en (2.6) se obliga a ubicar M número de estaciones de recarga en cada una de las zonas mostradas en la *Tabla 4* con el fin de distanciarlas. Por ultimo las ecuaciones (2.7) a (2.9) muestran la naturaleza de cada variable.

### 2.3 METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Para darle solución al problema planteado en la sección anterior, primero se debe codificar la variable decisión y encontrar el valor de los parámetros que conforman la función objetivo. Con todos los elementos del modelo matemático determinados se programa la función objetivo y se procede a implementar el algoritmo genético que encontrará la ubicación optima de las ERV en cada uno de los escenarios.

**2.3.1 Codificación.** Los cromosomas de alguna manera deberán contener información acerca de la solución que representa. La codificación se puede realizar de varias formas. La más utilizada es mediante una cadena de números binarios (1s o 0s). Pero también se puede realizar la codificación mediante números enteros o incluso cadenas de palabras<sup>8</sup>.

En la figura se muestra un ejemplo de la codificación del problema, donde el vector  $Vc_i$  es una variable binaria de decisión que indica en que nodo se encuentra conectada una ERV, en este ejemplo se encuentra conectada ERV en el nodo 4.

**Figura 8. Codificación binaria**

$$Vc_i = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots]_{1 \times n}$$

Donde  $n$  es el número de nodos del SDEE que en nuestro caso de estudio es 33.

**2.3.2 Parámetros del modelo matemático.** El modelo matemático planteado en la sección 2.2 tiene unos parámetros que se especifican continuación:

---

<sup>8</sup> ARRANZ DE LA PEÑA, J. d. I. P. J. Algoritmos genéticos, Madrid, España: Universidad Carlos III

**2.3.3 Costo del terreno ( $\Omega_i$ ).** Los precios del terreno en cada nodo se calcularon mediante el promedio del valor comercial de bienes inmuebles en cada una de las zonas mostrados en el mapa geoeconómico de ciudad de Bucaramanga. En la *tabla 4* se muestra el costo del terreno por metro cuadrado y total para cada una de las comunas en las que se encuentra el SDEE.

**Tabla 4. Precio del terreno en cada comuna.**

ZONA	PRECIO POR METRO CUADRADO (\$)	PRECIO TOTAL EN \$ (80 $m^2$ )
Comuna 3	2.766.783	221.342.640
Comuna 6	2.619.066	209.525.280
Comuna 12	5.004.886	400.390.880
Comuna 13	3.243.037	259.442.960
Comuna 15	3.029.825	242.386.000

**2.3.4 Costo de construcción ( $\beta$ ).** Se realizó un presupuesto que contempla los costos de mano de obra y materiales para la instalación de una estación de una ERV de dos módulos de carga, cada uno de 22 kW. Este presupuesto se puede ver en la tabla 1.

**2.3.5 Pérdidas de potencia en el SDEE. ( $\Delta P$ ).** Para encontrar las pérdidas de potencia en la red se utilizó el método Newton Raphson para solución de flujo de cargas debido que tiene una mayor velocidad de convergencia frente a otros métodos de solución disminuyendo los costos computacionales.

El método de Newton Raphson se basa en la expansión de las series de Taylor para resolver el problema de flujo de carga. Es un proceso iterativo que requiere valores iniciales cercanos a la solución como en Gauss-Seidel pero además requiere valores iniciales de las ecuaciones que modelan el estado de carga del sistema. A continuación, se muestra el algoritmo para la implementación del método de newton-Raphson; las ecuaciones utilizadas en el algoritmo son todas de potencia activa y reactiva, pero las variables continúan siendo los valores de tensión y ángulo en cada una de las barras en las cuales, por su naturaleza, sea necesario el cálculo de dichos valores<sup>9</sup>.

## 2.4 ALGORITMO GENÉTICO

Los algoritmos genéticos son métodos sistemáticos que sirven para la solución de problemas de búsqueda y optimización, que imitan la teoría de la evolución biológica de Charles Darwin. Para ello, se parte de una población inicial de la cual se seleccionan los individuos más capacitados para luego reproducirlos y mutarlos para finalmente obtener la siguiente generación de individuos que estarán más adaptados que la anterior generación<sup>10</sup>.

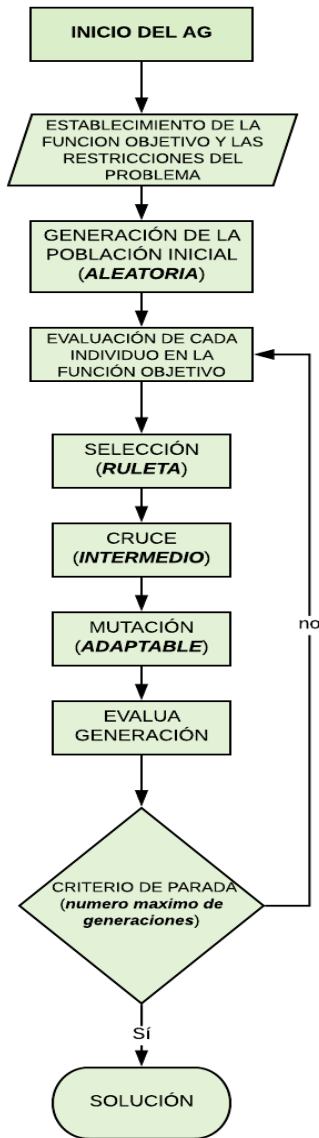
Para darle solución al modelo matemático planteado se implementó el algoritmo genético mediante el software MATLAB, con la ayuda del complemento Optimization Toolbox. En la figura 9 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético con los parámetros utilizados.

---

<sup>9</sup> STEVENSON, W. D. Análisis de sistemas eléctricos de potencia, 2 ed., México,S.A de C.V: McGRAW-HILL

<sup>10</sup> AGUINDA RINCÓN, J. M. S. Jairo antonio. Módulo básico para el aprendizaje de algoritmos genéticos como métodos de optimización, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2007

**Figura 9. Diagrama del AG implementado**



Para aplicar el algoritmo genético al campo de la resolución de problemas es necesario seguir una serie de pasos que se muestran a continuación:

1. Codificar los individuos y representar el problema a solucionar de una manera adecuada, estableciendo la función objetivo.
2. Generar una población inicial con un tamaño lo suficientemente grande para garantizar la diversidad de soluciones. Se aconseja que la población inicial sea creada de manera aleatoria para obtener dicha diversidad.
3. Evaluar la función objetivo con cada uno de los individuos de la población inicial.
4. Aplicar un operador de selección para escoger los mejores individuos, los cuales tendrán más oportunidad de reproducirse.
5. Aplicar operador de cruce y mutación.
6. Organizar la nueva población.

Se debe repetir desde el paso tres en adelante hasta que se cumpla el criterio de parada, ya sea fijar un número máximo de iteraciones antes de finalizar el algoritmo genético o detenerlo cuando no se produzcan más cambios en la población.

**2.4.1 Población inicial.** Indica el número de cromosomas que generamos en nuestra población para una generación determinada. En caso de que el tamaño sea insuficiente, el algoritmo genético tiene pocas posibilidades de realizar reproducciones con lo que se realizaría una búsqueda de soluciones escasa y poco óptima. Por otro lado, si el tamaño de la población es excesivo, el algoritmo genético será demasiado lento<sup>11</sup>.

La población inicial se determina de manera aleatoria para que la solución encontrada sea independiente. En el presente trabajo la población inicial será de 50 individuos.

**2.4.2 Conjunto de nodos candidatos ( $I$ ).** Para la solución de problema se discriminaron varios nodos del SDEE. El nodo 1 por ser el nodo más cercano a la subestación, los nodos 7,8,25,26,31 y 32 por superar la potencia máxima de 240kW al conectar las ERV, por lo tanto, el vector de nodos candidatos tiene la siguiente notación:

$$I \subset N$$

Donde:

$$\{1, 7, 8, 25, 26, 31, 32\} \notin I$$

$N$  es el conjunto de nodos del SDEE.

---

<sup>11</sup> ARRANZ DE LA PEÑA, Op. Cit.

**2.4.3 Selección.** Este operador selecciona los individuos más capacitados para que éstos sean los que se reproduzcan con más probabilidad de acuerdo con la teoría de Darwin en la cual los más capacitados son los que deben sobrevivir y crear una nueva descendencia más facultada. Por lo tanto, una vez evaluado cada cromosoma y obtenida su puntuación, se tiene que crear la nueva población teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a ésta. Esta selección se puede realizar de varias formas como se verá a continuación<sup>12</sup>.

El tipo de selección que se utilizará es el tipo ruleta, ya que es el método más común donde los mejores individuos tendrán una mayor probabilidad de ser seleccionados y así pasar a la siguiente generación.

La selección tipo ruleta consiste en que a cada uno de los individuos de la población se le asigna una parte proporcional a su ajuste de una ruleta, de tal forma que la suma de todos los porcentajes sea la unidad. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta mayor que la recibida por los peores. Generalmente, la población está ordenada en base al ajuste, por lo que las porciones más grandes se encuentran al inicio de la ruleta. Para seleccionar un individuo basta con generar un número aleatorio del intervalo [0...1] y devolver el individuo situado en esa posición de la ruleta. Esta posición se suele obtener recorriendo los individuos de la población y acumulando sus proporciones de ruleta hasta que la suma exceda el valor obtenido<sup>13</sup>.

**2.4.4 Cruce.** El objeto principal del proceso de cruce consiste en tomar dos individuos previamente seleccionados como padres y a partir de estos se logre obtener hijos los cuales heredan las mejores características de los padres<sup>14</sup>.

---

<sup>12</sup> *Ibíd.*

<sup>13</sup> D. R. R. D. P. Marcos Gestal. *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética*. Coruña: Universidade da Coruña, 2010

<sup>14</sup> ARRANZ DE LA PEÑA, Óp. Cit.

Existen gran variedad de operadores de cruce, sin embargo, es necesario un operador que dependa de las restricciones del problema, por lo que el más adecuado es el cruce intermedio. Este operador asegura que los padres factibles den lugar a hijos viables, donde la viabilidad depende de los límites y restricciones lineales.

**2.4.5 Mutación.** La función principal de la mutación radica en proporcionar un pequeño elemento de aleatoriedad en un individuo dentro de la población. Generalmente la probabilidad de mutación es menor al 1% esto se debe sobre todo a que los individuos muy mutados tienden a perder información heredada de los padres, provocando que el algoritmo nunca converja. Por otro lado, si una población tiene una probabilidad de mutación del 0% esta tenderá a converger prematuramente hacia un óptimo local. Computacionalmente la mutación consiste en variar aleatoriamente un gen de dentro del cromosoma, es decir si el gen que se desea mutar tiene un valor de 1 este será remplazado por un 0, ahora si el gen tiene un valor de 0 este será reemplazado por un 1<sup>15</sup>.

El operador de mutación debe acomodarse a las restricciones del problema, por lo cual se utiliza la mutación adaptable que genera aleatoriamente direcciones que se adaptan a la última generación exitosa o fallida, asegurándose que se cumplan los límites y las restricciones lineales.

**2.4.6 Criterio de parada.** Debido a que los algoritmos genéticos son métodos iterativos estocásticos, no garantizan convergencia y por lo tanto se hace necesario definir criterios de solución para el algoritmo. En consecuencia, el criterio escogido para terminar el algoritmo es por número máximo de generaciones, el cuál fue de 30.

---

<sup>15</sup> CHAVERRA, A. L. Evaluación de Heurísticas para la Gestión Óptima de Recursos Energéticos Locales en un Sistema de Distribución. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. 2016

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron al dar solución a varios escenarios que hacen parte del problema planteado anteriormente. Los resultados se presentarán mostrando la ubicación de las ERV, iniciando por el primer término de la función objetivo (perdidas del SDEE), luego se agrega el segundo término (Costo de construcción) y las restricciones descritas en el modelo matemático. Las estaciones de recarga estarán representadas por el siguiente icono:



Para corroborar el buen funcionamiento del AG, en el primer caso se presentan los resultados al ubicar una ERV teniendo en cuenta únicamente el término correspondiente al costo de las pérdidas de potencia. Se encontró primero la solución mediante el método de búsqueda exhaustiva, el cual consiste en evaluar cada posible solución en la función objetivo. Estos resultados se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5. Caso 1 Método de búsqueda exhaustiva.**

NODO	Valor función objetivo (pesos x10e6)	NODO	Valor función objetivo (pesos x10e6)
1	0,0000	18	2,4604
2	0,3332	19	2,4370
3	2,0411	20	2,1793
4	3,3115	21	2,0990
5	4,6194	22	2,3001
6	7,5294	23	2,3376
7	8,3534	24	2,4118
8	1,2371	25	2,4540
9	2,7934	26	2,4607
10	2,6774	27	2,4690
11	2,6538	28	2,5012
12	2,6076	29	2,5206
13	2,6422	30	2,5260
14	2,6559	31	2,5174
15	2,6603	32	2,5085
16	2,6009	33	2,4866
17	2,5199		

Mediante el uso del algoritmo genético se obtuvo la misma solución en un tiempo de 12 minutos frente a los 33 segundos que demora el método de búsqueda exhaustiva. Por lo cual no es viable utilizar este algoritmo para un caso con tan pocas soluciones posibles.

Figura 10. Ubicación de una ERV (nodo 1) para el caso 1



Como se puede observar en la figura 10 el resultado es el esperado ya que la ERV quedo ubicada en el primer nodo, que es el más cercano a la subestación y por ende las pérdidas son igual a cero.

Para evitar que la ERV quede ubicada en la subestación debido a las perdidas, se hace necesario agregar el segundo término de la función objetivo, junto con las restricciones del modelo matemático. Mediante la búsqueda exhaustiva mostrada en la tabla 6 se puede observar que el nodo con el menor valor de la función objetivo es el 23 con un costo de construcción y operación total aproximado de 258 millones de pesos.

**Tabla 6. Caso 2 Método de búsqueda exhaustiva.**

NODO	Valor función objetivo (pesos x10e6)	NODO	Valor función objetivo (pesos x10-6)
1	446,51	18	269,92
2	446,84	19	448,94
3	448,55	20	448,68
4	449,82	21	448,6
5	310,18	22	448,81
6	313,09	<b>23</b>	<b>257,98</b>
7	454,86	24	258,05
8	306,79	25	258,09
9	308,35	26	290,96
10	308,24	27	290,97
11	308,21	28	291
12	270,07	29	291,02
13	270,1	30	291,03
14	270,11	31	291,02
15	270,12	32	291,01
16	270,07	33	258,13
17	269,98		

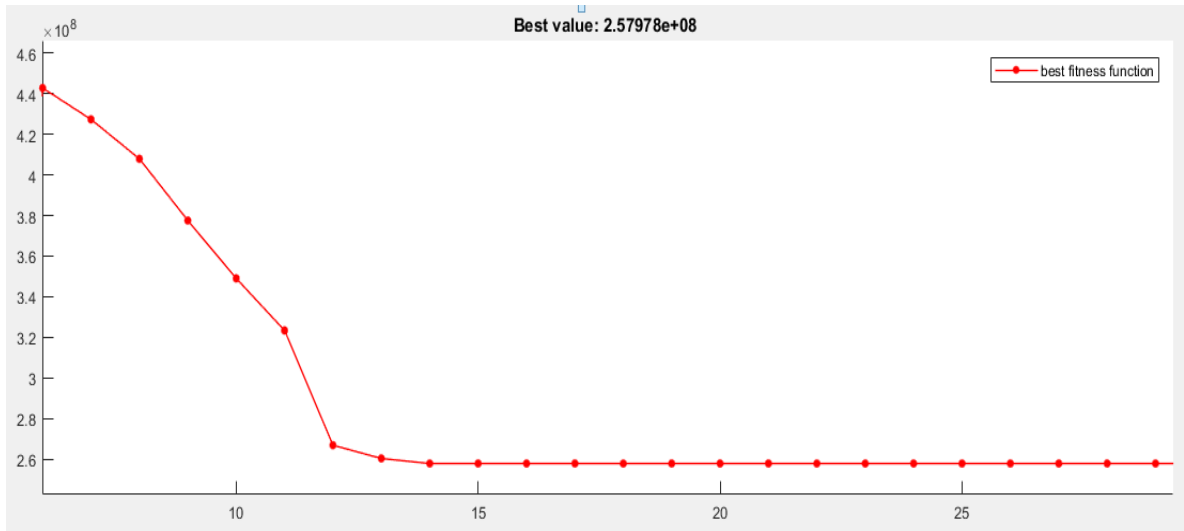
En la figura 11 se observa que el nodo 23 quedo ubicado el barrio nuevo Sotomayor donde el precio del terreno no es tan costoso y además está muy cerca de la fuente por lo cual sus pérdidas no son altas.

Figura 11. Ubicación de una ERV (nodo 23) para el caso 2.



Mediante el algoritmo genético fueron necesarias 15 generaciones para encontrar el individuo óptimo como se muestra en la figura 12. Al igual que en el primer caso se llegó al mismo resultado que el método de búsqueda exhaustiva y se puede concluir que para la ubicación de solo una estación de recarga, el uso del algoritmo no es viable ya que necesita de un mayor tiempo de trabajo y costos computacionales.

**Figura 12. Valor de la función objetivo en cada generación para el caso 2.**



Para determinar en qué casos es útil el uso del algoritmo genético fue necesario calcular el tiempo que demora el método de búsqueda exhaustiva para encontrar la solución en varios escenarios donde se varía el número de ERV a ubicar y el número de nodos del sistema de distribución. Los tiempos que se muestran en la tabla 7 se calcularon utilizando permutación para hallar el número total de posibles soluciones y luego multiplicado por el tiempo de una sola evaluación de la función objetivo.

**Tabla 7. Tiempo estimado para encontrar la solución mediante la búsqueda exhaustiva.**

	Numero de nodos de la red de distribución			
# ERV	33	50	100	150
1	33(s)	50(s)	100(s)	150(s)
2	17,6(m)	40.8(m)	2.75(h)	6,20(h)
3	9.0933(h)	32,67(h)	11,23(días)	38,28(días)

	Numero de nodos de la red de distribución			
# ERV	33	50	100	150
4	11,33(días)	63,97(días)	3(años)	15,63(años)
5	10,98(meses)	8,17(años)	290,46(años)	2282,40(años)

Como se puede observar en la tabla 7, en la zona roja no es necesario el uso de AG ya que su tiempo de convergencia es mucho mayor que mediante el uso de la búsqueda exhaustiva. Por lo cual es necesario ubicar al menos tres estaciones donde el uso del AG es muy útil ya que puede encontrar una buena solución en un tiempo aproximado a 30 minutos a comparación de las 9 horas que llevaría hacerlo por el método de fuerza bruta.

Teniendo en cuenta lo anterior el caso 3 consiste en agregar la restricción de ubicar mínimo 3 ERV en el SDEE, teniendo en cuenta los dos términos de la función objetivo. Como solución a este escenario los nodos óptimos a ser estación de recarga son los nodos 16,17 y 33 como se muestra en la figura 13 con un costo total aproximado a 799 millones de pesos. Se puede observar que dos de las tres estaciones quedaron ubicadas en nodos consecutivos, por lo que se hace necesario separarlas. En la figura 14 se evidencia la evolución del valor de la función objetivo en cada generación para el caso 3.

Figura 13. Ubicación de tres ERV (nodo 16, 17 y 33) para el caso 3.

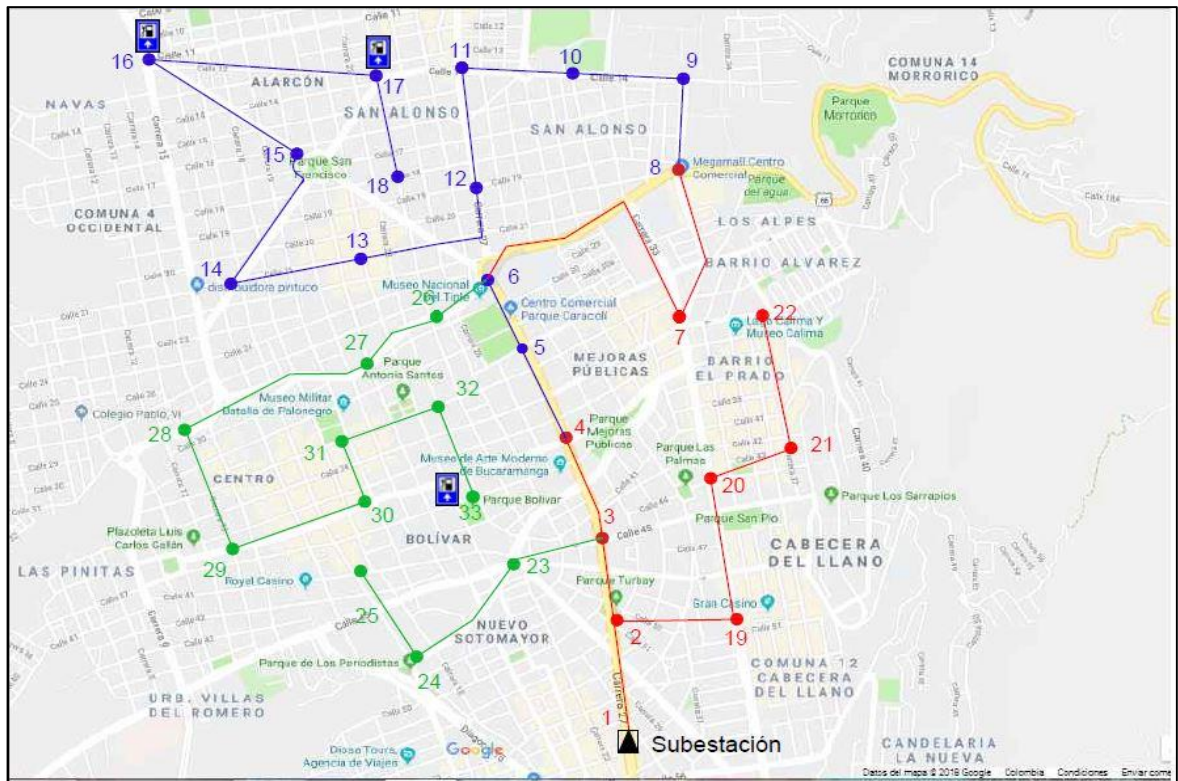
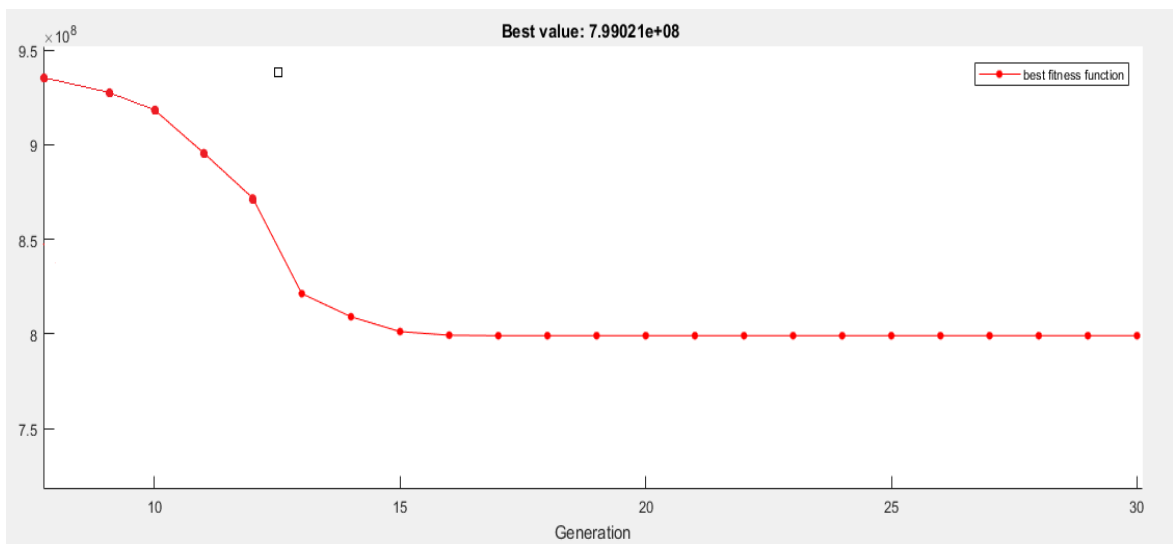


Figura 14. Valor de la función objetivo en cada generación para el caso 3.

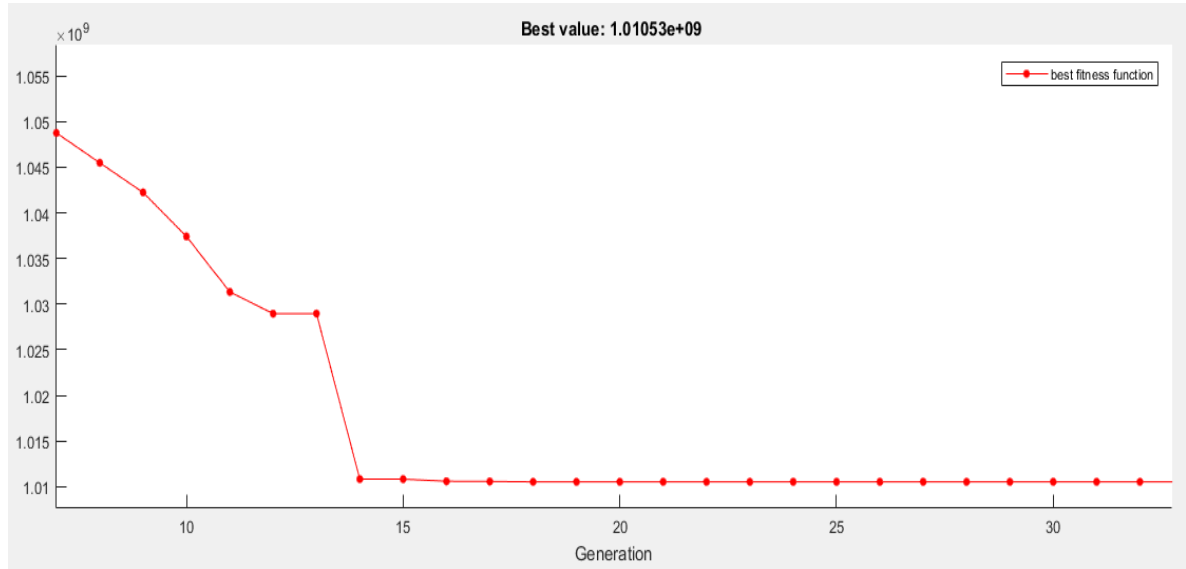


Para evitar que dos estaciones queden consecutivas. En el caso cuatro se hizo necesario distribuir los nodos en 3 zonas, las cuales se especifican en la Tabla 3, donde los nodos ubicados en cada zona se distinguen por colores: la zona 1 en color rojo, La zona 2 en color azul y la zona 3 en color verde. Para la distribución de las estaciones se añadió la restricción que obliga a ubicar una estación en cada zona. Las ubicaciones óptimas para este caso se muestran en la figura 15.

**Figura 15. Ubicación de tres ERV (nodo 18, 22 y 27) distribuidas por zonas, para el caso 4.**



**Figura 16. Valor de la función objetivo en cada generación para el caso 4.**



En la figura 16 se muestra el comportamiento del algoritmo genético donde se puede ver la evolución del valor de la función objetivo a medida que van pasando las generaciones, hasta encontrar el individuo óptimo el cual se mantiene por más de 15 generaciones.

**Tabla 8. Distribución de cada nodo óptimo en su zona.**

NODO	ZONA
22	1
28	2
27	3

Ubicar las 3 ERV con la distribución que se muestra en la tabla 8 tiene un costo de 1010 millones de pesos aproximadamente. Se puede observar que esta restricción aumenta en gran manera el costo, pero garantiza una mejor distribución de las

estaciones de recarga, siendo una solución viable tanto en movilidad como eléctricamente.

En la tabla 9 se muestra el resumen de los resultados en cada uno de los casos de estudio.

**Tabla 9. Resumen de los resultados.**

CASO DE ESTUDIO	DESCRIPCIÓN	NODOS ÓPTIMOS
1	Ubicar una ERV teniendo en cuenta únicamente el primer término correspondiente a las pérdidas de potencia.	1
2	Ubicar una ERV teniendo en cuenta los dos términos de la función objetivo, junto con las restricciones del modelo matemático.	23
3	El caso 3 consiste en agregar la restricción de ubicar mínimo 3 ERV en el SDEE, teniendo en cuenta los dos términos de la función objetivo.	16, 17 y 33
4	El mismo caso anterior, pero se agrega una restricción que distribuye las ERV por zonas.	18, 22 y 27

## 4. CONCLUSIONES

Se cumplió con el primer objetivo, el cual consistía en determinar las variables a tener en cuenta al momento de conectar una estación de recarga a un sistema de distribución. De esto se pudo concluir, que las pérdidas de potencia debidas a la conexión de la estación de recarga y el precio del terreno son las variables más significativas al momento de encontrar la ubicación óptima.

El uso de algoritmos genéticos es de gran utilidad cuando se necesita ubicar más de tres estaciones de recarga en un sistema de distribución; ya que, para una menor cantidad de estaciones, el uso de este método no es el más adecuado, debido a que requiere costos computacionales más altos en comparación al método de búsqueda exhaustiva el cual es más sencillo y demanda un tiempo de trabajo mucho menor.

Para determinar las características de una estación de recarga es necesario tener en cuenta la capacidad de la red, ya que esta limita el tipo de carga y la capacidad de la estación. La estación propuesta no contempló la posibilidad de ofrecer carga rápida, debido a que se requiere una adecuación del sistema de distribución, lo cual aumentaría los costos de inversión de manera considerable.

La metodología planteada en este proyecto de grado permite encontrar la ubicación de ERV's en una red de distribución, minimizando los costos de construcción y operación debido a pérdidas durante un año de funcionamiento. Esta metodología está enfocada a los operadores de red con el fin de realizar estudios de viabilidad económica y su impacto en la red de distribución.

## 5. TRABAJOS FUTUROS

Los inconvenientes ocasionados por la conexión de los vehículos eléctricos en las redes de distribución podrían ser mitigados con la implementación paralela de fuentes de energía renovables como la fotovoltaica, debido a que la generación distribuida permite mejorar el perfil de tensión, reducir las pérdidas y puede llegar a representar importantes ahorros para el operador de red. Estas variantes pueden ser trabajadas mediante el uso de técnicas heurísticas, ya que sería interesante su implementación como foco de investigación en futuros proyectos de grado.

## BIBLIOGRAFÍA

A. FENALCO. Informe de vehículos eléctricos e híbridos. Colombia. 2017.

ACOSTA, J. Carros eléctricos e híbridos quieren dar un salto en el mercado nacional. *PORTAFOLIO*, 12 Octubre 2017.

AGUINDA RINCÓN, J. M. S. JAIRO ANTONIO. Módulo básico para el aprendizaje de algoritmos genéticos como métodos de optimización. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2007.

ARRANZ DE LA PEÑA, J. d. I. P. J. Algoritmos genéticos. Madrid, España: Universidad Carlos III.

BARRERA, R. G. S. Ximena. El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21. 2 ed. Santiago de Cali: El Bando Creativo. 2015.

Battery University Group (BUG). Battery University. 15 November 2017. [En línea]. Disponible en: [http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries).

CELSIA. Celsia pone al servicio cinco nuevas estaciones de carga para vehículos eléctricos en Colombia. Medellin. Marzo, 2018.

CHAVERRA, A. L. Evaluación de Heurísticas para la Gestión Óptima de Recursos Energéticos Locales en un Sistema de Distribución, Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. 2016.

CIRCUTOR. Protecció i control de terres en la Recàrrega de Vehicles Elèctrics. Barcelona, España. 2017.

CRUZ, F. A. O. Ubicación óptima de estaciones de recarga de energía eléctrica para intercambio de baterías para vehículos eléctricos, Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira, 2017.

D. R. R. R. D. P. Marcos Gestal, Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética, Coruña: Universidade da Coruña, 2010.

E. UNIDAD N&E. Instalación de estaciones de carga para vehículos eléctricos. 2016.

ENDESA. Vehículo Eléctrico. [En línea]. Disponible en: <https://endesavehiculoelectrico.com/recarga/tipos-de-recarga/>. Finca Raiz.

IBAÑEZ. El motor de combustión es el más eficiente hoy: FALSO. Motorpasion, Enero, 2012.

IBAÑEZ. Tipos de conectores, tipos de recarga y modos de carga. MOTOTORPACION, 2012.

JARAMILLO PICO, S. A. M. P. Alejandra. Diseño de una Solución para la instalación de un punto de recarga masivo para vehículos eléctricos. Bucaramanga UIS. 2016.

LEZAMA, J. M. L. Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de distribución usando un modelo de programación no lineal entero mixto. 2011.

MINISTERIO DE INDUSTRIA ENERGIA Y TURISMO. IDEA. Mapa tecnológico movilidad eléctrica. Observatorio Tecnológico de la Energía. España, enero 2012.

PEÑA GRANADOS, E. M. B. S. Camilo Andres. Ubicación óptima de generación distribuida ante variaciones de carga y recursos energéticos utilizando algoritmos genéticos, Bogotá D.C., Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Noviembre,2017.

RODRÍGUEZ, A. B. A. D. Melissa. Estudios sobre el desempeño de Vehículos Eléctricos Dependiendo de. Facultad IEE. Universidad Pontificia Bolivariana. 2015. p. 15

STEVENSON, W. D. Análisis de sistemas eléctricos de potencia, 2 ed., México. S.A. de C.V: McGRAW-HILL.

TORO, R. X. L. Reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica basada en optimización de mapeo media-varianza, Quito, Ecuador. Escuela Politécnica Nacional. 2014.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A. Guía básica de uso para el Solver de algoritmos genéticos en MATLAB**

Esta guía aplica para el complemento optimization toolbox 7.6 utilizado en la versión R2017a de Matlab.

Para utilizar el solver de algoritmos genéticos es necesario seleccionarlo en el toolbox de optimización. Luego de seleccionado el cuadro será el mostrado en la figura 6.1 en el que ingresaremos los datos correspondientes al problema que se desea optimizar (que por defecto es para minimizar).

**Figura 0.1 Solver AG**

**Problem Setup and Results**

Solver: **ga - Genetic Algorithm**

Problem

Fitness function:

Number of variables:

Constraints:

Linear inequalities: A:  b:

Linear equalities: Aeq:  beq:

Bounds: Lower:  Upper:

Nonlinear constraint function:

Integer variable indices:

Run solver and view results

Use random states from previous run

Current iteration:

Final point:

En él se ingresan los siguientes datos: (R significa que es requerido obligatoriamente)

**Fitness function** : (R) es la función objetivo que se desea minimizar. Esta función se especifica de la forma @objetivo descrita en el anexo 2, donde objetivo.m es un M-file que retorna un escalar.

Entonces en el campo de Fitness function se pondría @objetivo .

**Number of variables (R):** es el número de variables de decisión en nuestro caso es el número de nodos del SDEE (33).

**Constraints:**

Las restricciones pueden ser lineales con signo de desigualdad, lineales con signo de igualdad y no lineales:

- **Linear inequalities** de la forma  $A*x \leq b$  son definidas por la matriz  $A$  y el vector  $b$ .
- **Linear equalities** de la forma  $Aeq*x = beq$  son definidas por la matriz  $Aeq$  y el vector  $beq$ .

**Bounds** son límites de las variables.

- **Lower** = límite mínimo (en forma de vector).
- **Upper** = límite máximo (en forma de vector).

**Nonlinear constraint function** define las restricciones no lineales las cuales se deben especificar como una función de la forma `@nonlcon`, donde `nonlcon.m` es un archivo `.m` que retorna los vectores  $c$  y  $ceq$ . Las igualdades no lineales son de la forma  $ceq = 0$ , y las desigualdades son de la forma  $c \leq 0$ .

Por ejemplo:

```
function [C Ceq] = problem_1_RES(x)
C = 0.25*x(1)^2 +x(2)^2 - 1;
Ceq = x(1) - 2*x(2) + 1;
End
```

Debe guardarse como `restriccionNL1.m` y luego en **Nonlinear constraint function** del toolbox se pone: `@ restriccionNL1` .

## Run solver(R)

Para correr el solver haga clic en **Start**

En el lado derecho se encuentran las opciones especiales del algoritmo como se muestra en la figura 6.2

**Figura 0.2** Opciones Solver AG

**Options** >>

Population

Population type: Double vector

Population size:  Use default: 50 for five or fewer variables, otherwise 200  
 Specify:

Creation function: Constraint dependent

Initial population:  Use default: []  
 Specify:

Initial scores:  Use default: []  
 Specify:

Initial range:  Use default: [-10;10]  
 Specify:

Fitness scaling

Selection

Reproduction

Mutation

Crossover

Migration

Constraint parameters

Hybrid function

Stopping criteria

Plot functions

Output function

Display to command window

## Population

- **Population type** especifica el tipo de individuos. Puede ser Double vector, o Bit string, o custom.
- **Population size** especifica cuántos individuos habrá en cada generación.

## Fitness scaling

Convierte valores de aptitud puros a valores en un rango, que es usado luego por la función de selección.

## Selection

Elige padres para la próxima generación con base en sus aptitudes reescaladas, se escoge el operador más adecuado dependiendo del problema.

## Reproduction

Determina como el AG crea hijos en cada nueva generación, se escoge el operador más adecuado dependiendo del problema.

## Mutation

En este campo se especifica la función que se encarga de realizar la mutación.

## Crossover

Combina 2 individuos padres para formar un Nuevo hijo para la próxima generación. En este campo se especifica la función a usar para realizar el cruce.

## Stopping criteria

Determina la causa por la que para el algoritmo

- **Generations:** especifica el número máximo de iteraciones.
- **Time limit:** especifica el tiempo máximo de corrida en segundos.
- **Fitness limit:** Si el mejor valor de aptitud es menor que o igual a un valor límite, el algoritmo para.

- **Stall time limit** — Si no hay mejoras en el mejor valor de aptitud por un intervalo de tiempo en segundos, definido por **Stall time limit**, el algoritmo se detiene.

### **Plot Functions**

Permite dibujar varias características de los AG a medida que se va ejecutando.

- **Plot interval** especifica el número de generaciones entre actualizaciones sucesivas de la gráfica.
- **Best fitness** dibuja el mejor valor de aptitud versus el número de iteración.
- **Best individual** dibuja los valores de x del mejor individuo la generación.
- **Scores** grafica los valores de los individuos en cada generación.
- **Max constraint** grafica la máxima violación de la restricción no lineal.
- **Range** grafica los valores de aptitud mínima, máximo y medio en cada generación.

## ANEXO B. Función objetivo

A continuación, se muestra el código de la función objetivo del problema:

```
function U = objetivo(vc)
Ba=1;%BASE EN MVA DEL SISTEMA
%%Barras=33;%NUMERO DE BARRAS
Datos = xlsread('red33.xlsx');
disp(' INDIVIDUO: ');
disp(vc);
F = Datos(:,5);
E=(0.044*ones(1,33))'; %vector de potencia de la estacion(44kW)
L=((vc').*E)+F;
Datos(:,5)= L;
Lineas=xlsread('red33.xlsx',2);
%% INICIO NEWTON RAPHSON
%% Obtencion de la Matrix Y-BARRA y Z-BARRA
lb= Lineas(:,1); % barra de inicio
Fb= Lineas(:,2); % barra final
r = Lineas(:,3);
x = Lineas(:,4);
b = Lineas(:,5);
a = Lineas(:,6); % Tap
z = r + i*x;
y = 1./z;
b = i*b;
nb = max(max(lb),max(Fb)); % numero de barras en el sistema
nl = length(lb); % numero de lineas en el sistema
Y = zeros(nb,nb); % matrix Y-BARRA de ceros inicial
```

```

for k = 1:nl
    Y(lb(k),Fb(k)) = Y(lb(k),Fb(k)) - y(k)/a(k);
    Y(Fb(k),lb(k)) = Y(lb(k),Fb(k));
end
for m = 1:nb
    for n = 1:nl
        if lb(n) == m
            Y(m,m) = Y(m,m) + y(n)/(a(n)^2) + b(n);
        elseif Fb(n) == m
            Y(m,m) = Y(m,m) + y(n) + b(n);
        end
    end
end
end
Y; % Y-BARRA del sistema
Z = inv(Y); % Z-BARRA del sistema
%% Datos de SISTEMA en por unidad
%%Ba = 100; % MVA Base
type = Datos(:,1); %tipo de barra
bus = Datos(:,2); % numero de barras
Pg = Datos(:,3)/Ba;
Qg = Datos(:,4)/Ba;
Pc = Datos(:,5)/Ba;
Qc = Datos(:,6)/Ba;
V = Datos(:,7); % Tension de sistema
del = Datos(:,8); % Angulo delta de las barras
Qmin = Datos(:,9)/Ba; % Limite minimo de reactiva
Qmax = Datos(:,10)/Ba; % Limite maximo de reactiva
%% ECUACIONES DE FLUJO
P = Pg - Pc;
Q = Qg - Qc;

```

```

Psp = P;
Qsp = Q;
G = real(Y);
B = imag(Y);
%% TIPOS DE BARRAS DEL SISTEMA DE POTENCIA
pv = find(type == 2 | type == 1);
pq = find(type == 3);
npv = length(pv);
npq = length(pq);
%% CALCULO DE JACOBIANO
nbus = nb;
Tol = 1;
Iter = 1;
%%Margen=input('INGRESE EL MARGEN DE ERROR DEL SISTEMA=');
Margen=0.001;
while (Tol > Margen) % margen de error
    P = zeros(nbus,1);
    Q = zeros(nbus,1);
    % calculo para la obtencion de P Y Q de las ecuaciones de flujo
    for j = 1:nbus
        for k = 1:nbus
            P(j) = P(j) + V(j)*abs(Y(j,k))*V(k)*cos(del(j)-del(k)-angle(Y(j,k)));
            Q(j) = Q(j) + V(j)*abs(Y(j,k))*V(k)*sin(del(j)-del(k)-angle(Y(j,k)));
        end
    end
end
% Verificación de los límites de potencia Reactiva Q
if Iter <= 7 && Iter > 2
    for n = 2:nbus
        if type(n) == 2
            QG = Q(n)+Qc(n);

```



```

        H(j,k) = H(j,k) - V(m)^2*B(m,m);
    else
        H(j,k) = V(m)*abs(Y(m,n))*V(n)*sin(del(m)-del(n)-angle(Y(m,n)));
    end
end
end
N = zeros(nbus-1,npq);
for j = 1:(nbus-1)
    m = j+1;
    for k = 1:npq
        n = pq(k);
        if n == m
            for n = 1:nbus
                N(j,k) = N(j,k) + V(m)*abs(Y(m,n))*V(n)*cos(del(m)-del(n)-angle(Y(m,n)));
            end
            N(j,k) = N(j,k) + V(m)^2*G(m,m);
        else
            N(j,k) = V(m)*abs(Y(m,n))*V(n)*cos(del(m)-del(n)-angle(Y(m,n)));
        end
    end
end
J = zeros(npq,nbus-1);
for j = 1:npq
    m = pq(j);
    for k = 1:(nbus-1)
        n = k+1;
        if n == m
            for n = 1:nbus
                J(j,k) = J(j,k) + V(m)*abs(Y(m,n))*V(n)*cos(del(m)-del(n)-angle(Y(m,n)));
            end
        end
    end
end

```



```

del(2:nbus) = dTh + del(2:nbus);
k = 1;
for j = 2:nbus
    if type(j) == 3
        V(j) = dV(k) + V(j);
        k = k+1;
    end
end
lter = lter + 1;
Tol = max(abs(M));
%disp('Margen de error ')
%disp(Tol)
end
disp('Numero de iteraciones del NR')
disp(lter)
Del = 180/pi*del;
Vm=V.*cos(del) + j*V.*sin(del);
I1 = Y*Vm;
Im = abs(I1);
Ia = angle(I1)*180/pi;
%%PERDIDAS DE LAS LINEAS
K=[];
for j=1:8
    K=[K (Lineas(j,3)/(Lineas(j,3)^2 +Lineas(j,4)^2))*( V(Lineas(j,1))^2
+V(Lineas(j,2))^2 -2*V(Lineas(j,1))*V(Lineas(j,2))*cos((Del(Lineas(j,1))-
Del(Lineas(j,2)))*pi/180));
end
%%FIN NEWTON RAPHSON
%%TERMINO 1 perdidas
Pr=200;%precio perdidas

```

```

Tm=24*360;% tiempo en horas
Kc=1000;% cte de conversión MW akW
Lb=0.875977939651911;%perdidas base
PT=sum(K);%pérdidas totales
%%TERMINO 2
%costo de terreno
CT=ones(1,33);%costo del terreno
Pc3=221342640; %% precio terreno comuna 3 en pesos.
Pc6=209525280;%% precio terreno comuna 6 en pesos.
Pc12=400390880;%% precio terreno comuna 12 en pesos.
Pc13=259442960;%% precio terreno comuna 13 en pesos.
Pc15=242386000;%% precio terreno comuna 15 en pesos.
CT(1,1:4)=Pc12;CT(1,7)=Pc12;CT(1,19:22)=Pc12;CT(1,12:18)=Pc3;%ubicando
precios en el vector costo terreno
CT(1,5:6)=Pc13;CT(1,8:11)=Pc13;CT(1,23:25)=Pc6;CT(1,33)=Pc6;CT(1,26:32)=Pc
15;%ubicando precios en el vector costo terreno

%Costo construcción
CC=46114812*ones (1,33);
%costo total
CTT=CT+CC; %costo total: construcción más precio del terreno

%%FUNCIÓN OBJETIVO
disp(' Función Objetivo ');
U = Pr*Tm*Kc*(PT-Lb)+ sum (vc.*CTT)
end

```