

# Planeación óptima de redes aéreas de distribución basada en teoría de grafos

## Optimal overhead distribution network planning based graph theory

**Esteban Bladimir Herrera-Cisneros**  
Universidad Politécnica Salesiana  
Quito, Ecuador  
eherrerac1@est.ups.edu.ec

**Esteban Mauricio Inga-Ortega**  
Universidad Politécnica Salesiana  
Quito, Ecuador.  
einga@ups.edu.ec

**Resumen**– Este trabajo presenta un modelo para optimizar los recursos utilizados en la planeación de una red de distribución aérea, la cual permite el despliegue de los transformadores considerando su cobertura y su capacidad. Muestra un modelo de enrutamiento de la red de media tensión basado en *minimum Steiner tree* para encontrar la mejor ruta en una zona georreferenciada. La planeación se realiza sobre un escenario georreferenciado con datos de la plataforma *OpenStreetMap*, con el fin de que la localización de los transformadores y la topología de la red sean reales. Los valores obtenidos muestran un punto de partida para que las empresas de distribución eléctrica establezcan planes de trabajo para la expansión y planificación de la red eléctrica de distribución, considerando la variabilidad a la que se presenta la demanda.

**Palabras clave**– Optimización, planificación óptima, redes de distribución eléctrica, árbol mínimo de Steiner, transformadores.

**Abstract**– The paper presents a model for optimizes the resources used in the overhead distribution network planning, which allows the deployment of transformers considering coverage and capacity of them. It shows a routing model of the media voltage network based of *minimum Steiner tree* to find the best route in a geo-referenced area. The planning has been made over a geo-referenced scenery with data from *OpenStreetMap* platform, with the purpose of locations the transformers and the topology of the net area real. Results imply a starting point for electricity distribution companies to establish work plans for de expansion and planning of the electricity distribution network considering the variability at the demand present.

**Keywords**– Optimization, optimal planning, electrical distribution network, minimum Steiner tree, transformers.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución eléctrica constituyen una de las partes importantes dentro de un sistema eléctrico, ya que son las primeras en ser consideradas para la planeación y expansión de estos; a su vez, representan el enlace final del sistema eléctrico con los usuarios [1]. Por lo que es de gran importancia mantener los sistemas en un óptimo funcionamiento con estándares de servicio y calidad, también se debe considerar la expansión del sistema de distribución para permitir la cobertura en el abastecimiento de energía eléctrica a los usuarios dentro de sus áreas de servicio [2]. Dado que los sistemas se encuentran en constante crecimiento y expansión según investigaciones realizadas, por lo que es de valor analizar métodos que nos permitan cumplir estos requerimientos. Uno de estos métodos implica el uso de la planificación en las redes de distribución, ya que pueden ser empleadas tanto en redes aéreas como en redes soterradas; para la aplicación de la planeación en las redes de distribución eléctrica habitualmente se encuentran tres tipos: planeamiento de expansión, planeamiento de operación y planeamiento de construcción nueva [3].

Para el planeamiento de las redes de distribución se debe conocer la región geográfica de emplazamiento y la potencia instalada de cada carga, con el objetivo de encontrar rutas y configuraciones óptimas para su despliegue [4], para el diseño de las redes no solo se debe considerar la carga actual, sino también la carga que se espera exista dentro de un horizonte de tiempo; lo

que significa que el problema de diseño es dotado de cierta incertidumbre [5]. Cabe recalcar que en el diseño de las redes de distribución pueden darse de forma radial o en malla; sin embargo, por cuestiones prácticas en la ingeniería la gran mayoría de las redes de distribución funcionan como redes radiales, dado que el análisis implica menor complejidad [6]. En cuanto a los datos exactos de los usuarios las empresas de distribución presentan inconvenientes, dado que con el constante crecimiento de la demanda el levantamiento de la información se vuelve difícil; por lo tanto, se utilizó la plataforma OpenStreetMap (OSM) en busca de información real con el fin de exponer al modelo a condiciones prácticas de enrutamiento en escenarios típicamente urbanos [7].

Planificar una red de distribución eléctrica minimizando los costos de instalación y operación es una actividad compleja, puesto que existe una gran variedad de alternativas técnicas viables; conllevando al uso de herramientas de optimización y así permitir ahorrar importantes recursos a las empresas de distribución, debido a la magnitud de las inversiones requeridas. El problema de la planificación de las redes de distribución se establece claramente como un problema de naturaleza combinatoria con funciones no lineales, donde la función objetivo es la de minimizar los costos, sujeta a restricciones técnicas de operación del servicio de energía eléctrica [8], [9].

Comúnmente se utilizan modelos matemáticos fundamentados en heurísticas para la solución del planeamiento en las redes de distribución, ya que estos permiten calcular y encontrar soluciones cercanas a la óptima; sin embargo, existen otros modelos matemáticos que usan procesos evolutivos y de pronóstico que permiten encontrar soluciones óptimas, tales como: método matemático de programación y algoritmo aleatorio de optimización (algoritmo genético, algoritmo de colonia de hormigas y algoritmo de enjambre de partículas), estos son algoritmos mejorados que sirven específicamente para la aplicación en la planeación de las redes de distribución [10]. A pesar de ello, la evolución de los algoritmos tradicionales todavía afronta dificultades relacionadas con las características combinatorias del problema de planificación de las redes de distribución, puesto que existe una gran cantidad de variables involucradas en el proceso [11].

Para nuestro estudio se consideró el uso de algoritmos basados en heurísticas con el objetivo de minimizar los costos relacionados con los recursos empleados en la construcción de la red de distribución, usando procesos de crecimiento controlado que permita hacer una cobertura de todos los usuarios, conociendo la capacidad de los transformadores y buscando mediante el uso de un árbol mínimo de Steiner el enrutamiento de la topología de la red. El árbol mínimo de Steiner o minimum Steiner tree se encuentra basado en la teoría de grafos y puede ser resuelto por diversos algoritmos, incluyendo el algoritmo de Dijkstra [12], hallando la ruta o el camino más corto con el fin de que todos los usuarios del sistema eléctrico se puedan conectar a la red de distribución [13].

En adelante, el artículo se estructura de la siguiente manera; en la sección II se abarca temas relacionados con la planeación óptima de las redes de distribución. En la sección III se describe el modelo de optimización para la planeación de la red de distribución propuesto, la sección IV engloba el análisis pertinente a los resultados obtenidos de la optimización, con la ubicación de los transformadores óptimos georreferenciados y la construcción de la topología de la red. Por último, en la sección V se concluye el artículo.

## **2. PLANEACIÓN DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA**

### **2.1 Redes de distribución eléctrica**

En la literatura la planeación de un sistema de distribución eléctrico aéreo o soterrado se expone a diversos impedimentos de construcción, englobando limitaciones técnicas y ambientales [10]; por lo que es de gran importancia que la red de distribución pueda adaptarse a las características del diseño general de la ciudad o área funcional en la que va a operar, ajustándose al patrón general de la ciudad [14]. Así pues, tradicionalmente las redes de distribución se proyectan de forma radial y aérea, debido a que el diseño técnico y económico es relativamente bajo en relación con un diseño de una red soterrada [15]; estos costos pueden reducirse significativamente o a su vez pueden ser evitados considerando simultáneamente datos geográficos y rutas de líneas existentes dentro de la planeación de las

redes. La implementación de las restricciones geográficas proporciona un filtrado y procesamiento de la materia prima de datos geográficos, dando como resultado posibles enrutamientos con el objetivo de obtener datos de entrada de referencia para la planificación de la red [16].

El diseño de una red de distribución eléctrica se la puede identificar como un grafo denotado por  $G = (V, E)$  el cual contiene todas las posibles rutas y conexiones para el enrutamiento de la red; este grafo se lo extrae del mapa de la ciudad donde se va a realizar la planeación. Donde  $V$  es el conjunto de nodos o vértices (se incluyen cargas, transformadores, intersecciones de los enlaces y subestaciones) y  $E$  es el conjunto de elementos designados como aristas (conexión del medidor inteligente hacia la red de baja tensión del sistema de distribución) [17], [18]; se denota que los puntos Steiner son los puntos de conexión del medidor inteligente más conocidos como acometida. Cada una de las conexiones tiene un peso definido correspondiente al cálculo de la distancia que existe entre cada vértice, dicha distancia es calculada con la fórmula de Haversine, puesto que tiene mayor exactitud cuando se usa en puntos georreferenciados [19].

### 2.1.1 Árbol de Steiner

Se ha encontrado que la explicación de los árboles de Steiner puede ser bastante comprensible sin que esto implique que la resolución del método sea simple, de hecho, el problema es de tipo NP-hard, ya que no requiere tratamiento de tipo polinomial. Para el efecto de comprender el objetivo se ha de suponer la existencia de una cantidad determinada de puntos que se deben enlazar, primeramente, se debe considerar el árbol mínimo de expansión inicial, con esto se obtiene el camino más corto de los puntos existentes, una vez realizado el MST (minimum spanning tree), se crea una cantidad de puntos auxiliares aleatorios denominados puntos de Steiner (Stp) para reducir la longitud total; con los Stp obtenidos se crea un nuevo árbol de conexión denominado árbol de Steiner [20].

El árbol de Steiner ha sido empleado en aplicaciones de ingeniería, ya que permite encontrar el camino global más corto, para poder superar

la deficiencia existente en los algoritmos de optimización basados en teoría de grafos; y detalla en encontrar un árbol con un peso mínimo para un grafo y un conjunto de vértices. Para la resolución del problema del árbol mínimo de Steiner, según investigaciones, existen varios métodos, tales como el de la distancia más larga y un algoritmo de planificación jerárquica basado en análisis de las topologías de las redes [21], [22].

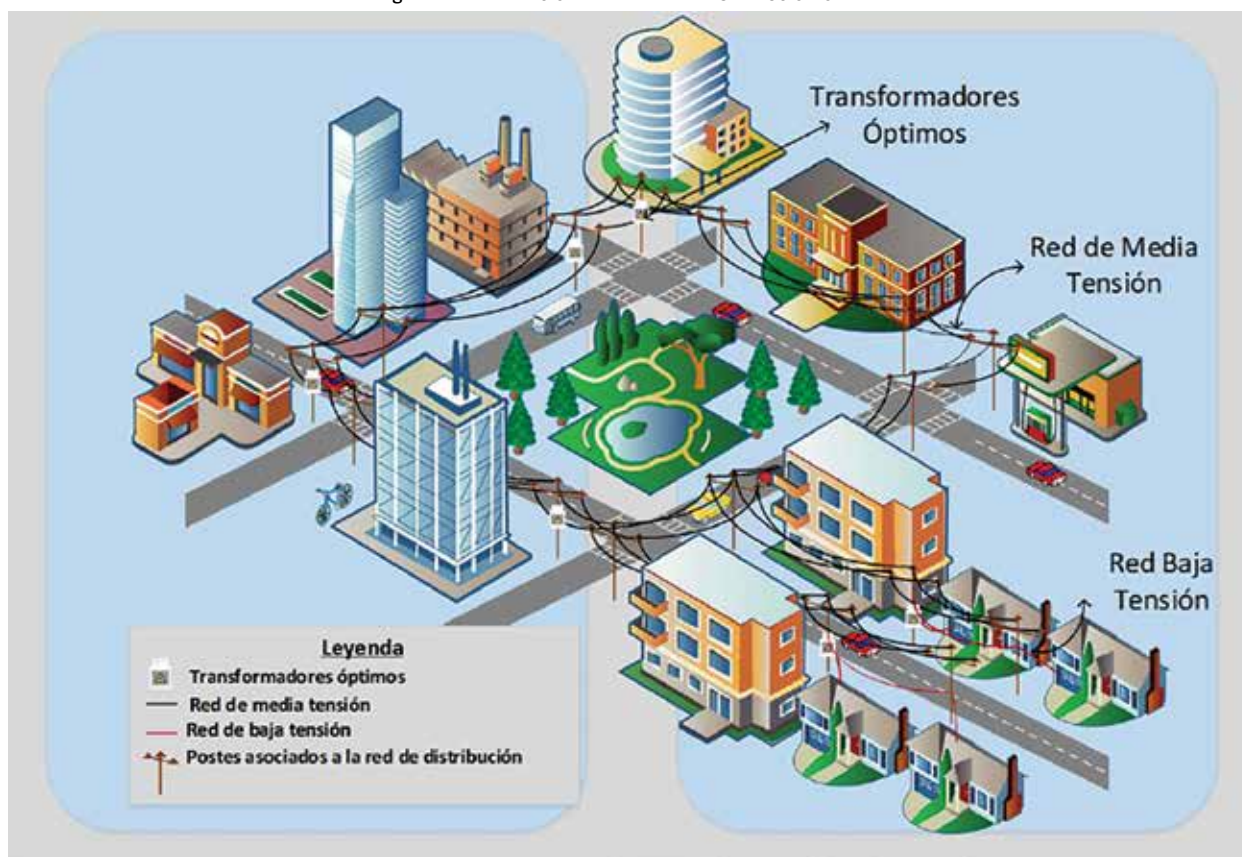
### 2.2 Capacidad y cobertura de zonas georreferenciadas de las redes de distribución eléctrica

El despliegue de cada uno de los transformadores deberá considerar los principales problemas de cobertura y capacidad que ocurren dentro de una red de distribución eléctrica, para lo cual tomará coordenadas de las casas más cercanas, de tal forma que los enlaces sean óptimos y no se permita recorrer distancias excesivamente grandes. Uno de los principales objetivos es el empleo de ubicaciones georreferenciadas para cada dispositivo eléctrico que se vaya a implementar. Para lo cual se ha planteado un margen de cobertura y una capacidad que permite albergar cierta cantidad de usuarios, conociendo los sitios factibles en que se puedan ubicar cada uno de los transformadores [23].

## 3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para solventar el problema existente en la planeación óptima de las redes aéreas de distribución se plantea un modelo matemático basado en heurísticas, el cual nos permite minimizar la cargabilidad de los transformadores de distribución mediante la restricción de conexión de los usuarios, a su vez el modelo también plantea la reducción del uso de conductores en la implementación de la red de distribución eléctrica considerando costos; todo eso se realiza bajo un escenario georreferenciado. Los usuarios que se pueden conectar a los transformadores de distribución variable, cabe denotar que los valores utilizados son con fines explicativos; esto nos permite identificar las distintas particiones que se van a hacer en la parte de bajo voltaje para poder solventar con las necesidades técnicas y económicas de energía a los usuarios, tal como se puede observar en la Fig. 1.

Fig. 1. IMPLEMENTACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA



Fuente: Autores.

Con el fin de alcanzar lo antes mencionado se plantea el uso de clusterización por medio del Algoritmo de K-Medoids seccionando el total de los usuarios en grupos más pequeños para la restricción de conexión hacia los transformadores, esto nos permite encontrar un centroide para cada grupo; con este centroide obtenido se verifica si es el punto más óptimo de ubicación del transformador.

Para realizar el procedimiento de la conexión de estos grupos de usuarios se optó por la utilización de un árbol mínimo de Steiner, que radica en la selección de un punto más cercano a la vivienda sobre la red de distribución y posterior la creación de dicho punto de Steiner. El punto de Steiner es agregado a los nuevos puntos existentes de conexión. Teniendo en cuenta que una vez creados los nuevos puntos existentes de conexión a base de los puntos de Steiner se modifica la conectividad de los usuarios hacia los transformadores más cercanos. Con lo cual mediante una variación del algoritmo de Dijkstra se logra interconectar los

puntos Steiner hacia el punto más óptimo de ubicación de los transformadores.

Lo anteriormente explicado nos da la metodología para la creación de la red de baja tensión; en cambio para la conexión de los transformadores hacia la red de media tensión se utiliza el algoritmo de Dijkstra, ya que este nos permite encontrar el camino más corto al menor costo, debido a criterios de diseño, el cual no considera todas las calles como lugares de ubicación para la red eléctrica. Para el diseño de la red de distribución eléctrica se tiene como variables de inicio el número de usuarios  $N$ , donde se encuentran asociados las coordenadas de latitud y longitud de las viviendas,  $T$  coordenadas de ubicación de los transformadores. El modelo planteado elige de forma óptima donde ubicar y desplegar los transformadores, con el fin de que se logre una conectividad al cien por ciento de todos los usuarios. Denotamos que el problema de planeación óptima de redes aéreas de distribución tiene como función objetivo (1).



$$FO \rightarrow MIN = \sum_i \sum_j Cost_{ij} * Dist_{ij} \quad (1)$$

Donde:

$Cost_{ij}$ , es el costo unitario asociado al trayecto del punto i al punto j.

$Dist_{ij}$  distancia del punto i al punto j.

Para lo cual se han considerado ciertas restricciones que nos permita cumplir con las condiciones de minimizar los costos y reducir el uso de recursos en la instalación de las redes de distribución:

$$\sum_j Usu_j \leq Cap_i^{trafo} \quad (2)$$

$$Dist_{ij} \leq Dist_{min} \quad (3)$$

La ecuación (2) nos permite limitar el número de usuarios que se pueden conectar a los transformadores que se crean, la restricción (3) se cumple la condición de que los enlaces para el árbol mínimo de Steiner sean al menor costo ya que se limita la distancia. Las variables utilizadas en el modelo matemático para la planeación óptima se pueden observar en la Tabla I.

TABLA I  
TABLA DE VARIABLES

$X_c, Y_c$	Vector de coordenadas (latitud y longitud) de cada vivienda
N	Número de viviendas
$Dist_{min}$	Distancia mínima
$Dist_{ij}$	Distancia euclidiana calculada
G	Matriz de conectividad
calles	Coordenadas de todos los puntos de las calles
S	Conjunto de coordenadas de los circuitos por transformador
T	Conjunto de transformadores óptimos por circuito
nodos_calles	Puntos Steiner usados para la construcción del árbol de Steiner
$X_{con}, Y_{con}$	Coordenadas de la ubicación de los centroides de las viviendas dadas por la clusterización
C	Clúster obtenido en la clusterización de los nodos_calles
Idx	Identificación de cada clúster

Posteriormente se define el pseudocódigo que nos va ayudar a resolver el problema planteado para lograr una conectividad de todos los usuarios a la red de distribución.

TABLA II  
ALGORITMO 1

<b>Creación de los puntos Steiner para la obtención del árbol mínimo de Steiner</b>
Grafo Georreferenciado (OSM) por OpenStreetMap
<p><b>Inicio:</b></p> <p>Extraer coordenadas de las viviendas (<math>X_s, Y_s</math>)</p> <p>Extraer coordenadas de las calles (<i>calles</i>)</p> <p>Extraer número de viviendas <math>N</math></p> <p>Para todo <math>ii \in N</math></p> <p>Si: <math>X_s, Y_s &gt; 3</math></p> <p>Para todo: <math>i \in (X_s, Y_s) y j \in \text{calles}</math></p> <p><math>Dist_{ij}(X_s, Y_s; \text{calles})</math></p> <p>Fin Para</p> <p>Si: <math>Dist_{ij} \leq Dist_{min}</math></p> <p>Buscar <math>Dist_{ij}</math> en las coordenadas <math>X_s, Y_s</math></p> <p>nodos_calles (<math>X_s, Y_s</math>)</p> <p>Fin Si</p> <p>Caso contrario: Clusterización (<math>X_s, Y_s</math>)</p> <p>Para todo: <math>i \in (X_{con}, Y_{con}) y j \in \text{calles}</math></p> <p><math>Dist_{ij}(X_{con}, Y_{con}; \text{calles})</math></p> <p>Fin Para</p> <p>Si: <math>Dist_{ij} \leq Dist_{min}</math></p> <p>Buscar <math>Dist_{ij}</math> en las coordenadas <math>X_{con}, Y_{con}</math></p> <p>nodos_calles (<math>X_{con}, Y_{con}</math>)</p> <p>Fin Si</p> <p>Fin Si</p> <p>Fin Para</p> <p>Fin</p>

La respuesta del algoritmo 1, mostrado en la Tabla II variará dependiendo del escenario que se va a analizar; la segunda fase es la construcción de la red de bajo y medio voltaje, la cual se observa a continuación:

TABLA III  
ALGORITMO 2

<b>Construcción y despliegue óptimo de la red de distribución aérea</b>
Grafo Georreferenciado (OSM) por OpenStreetMap
Extraer del algoritmo 1 los valores de <i>nodos_calles</i>
Inicio:
Clusterización( <i>nodos_calles</i> )
Para todo: $ii \in N$
Asignación a los <i>nodos_calles</i> con cada <i>idx</i> ( $nodos\_calles_{idx}$ )
Verificación mediante centroide la ubicación de transformadores óptimos en
$X_{Trafo}, Y_{Trafo} \forall ii \rightarrow C$
Fin Para
Construcción de la red de bajo voltaje
Para todo: $ii \in C$
Ingresar parámetros ( $nodos\_calles_{idx}$ ) en el algoritmo modificado de Dijkstra
Graficar todos los caminos obtenidos
Fin Para
Construcción de la red de medio voltaje
Ingresamos los parámetros de ( $X_{Trafo}, Y_{Trafo}$ ) en ( <i>calles</i> )
Para todo: $jj \in calles$
Calculamos la nueva matriz de conectividad G
Fin para
Ingresar los nuevos parámetros en el algoritmo de Dijkstra
Graficar los caminos obtenidos
Fin

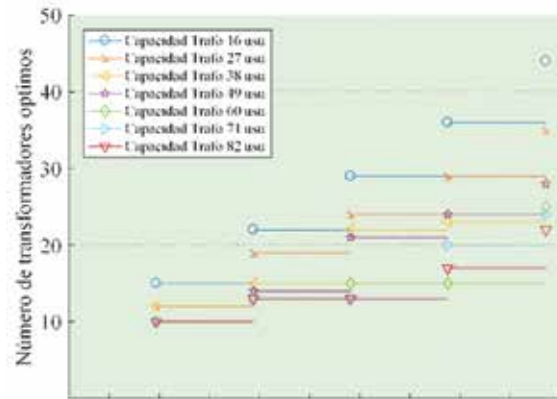
#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Fig. 2 se puede apreciar el comportamiento del modelo frente a varios escenarios de capacidad en los transformadores para lo cual se tiene valores de capacidad de 16, 27, 38, 49, 60, 71 y 82; en cada uno de los escenarios propuestos se dispone de distintas densidades poblacionales de 97, 194, 291, 388 y 486 clientes.

Los resultados obtenidos nos permiten diagnosticar distintas opciones en el despliegue de las redes aéreas de distribución; se advierte que

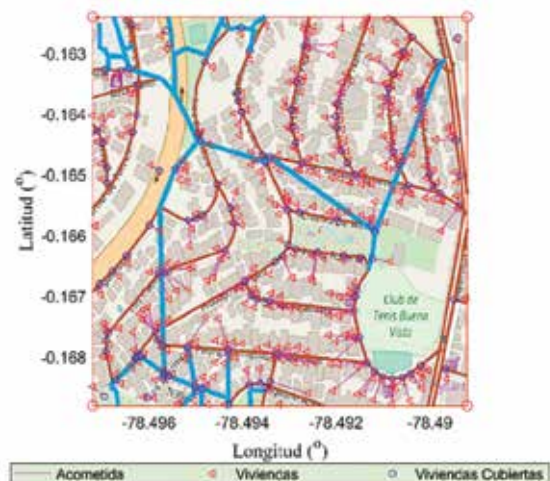
el modelo tiene la capacidad de ser escalable, ya que nos permite modificar ciertos parámetros obteniendo resultados óptimos para cada escenario. Hay que destacar que cuan mayor sea el número de usuarios, la cantidad de transformadores óptimos que se despliegan depende directamente de la capacidad que se le asigne a cada uno; así podemos suponer que cuando la capacidad es mayor, el número de transformadores que el modelo escoja va a ser el menor y por consecuente el más óptimo. En la Fig. 3 muestra el comportamiento de la planeación mediante el uso de un árbol mínimo de expansión para la red de media tensión, en dicho modelo se considera las esquinas como punto de conexión de los usuarios, por lo cual obliga a que la expansión sea ineficiente y a su vez más costosa.

Fig. 2. RELACIÓN DEL NÚMERO DE TRANSFORMADORES ÓPTIMOS VS. EL NÚMERO DE CLIENTES



Fuente: Autores.

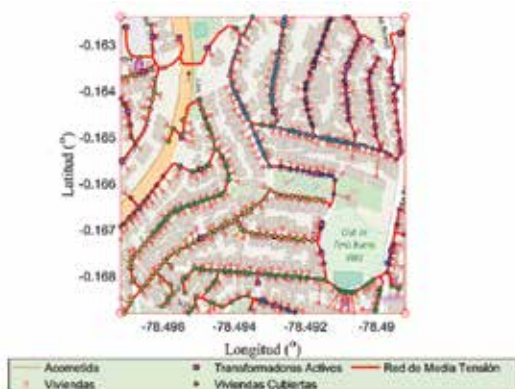
Fig. 3. PLANEACIÓN DE RED DE DISTRIBUCIÓN AÉREA CON ÁRBOL MÍNIMO DE EXPANSIÓN



Fuente: Autores.

En contraste la Fig. 4 evidencia una planeación similar con la diferencia que se han incluido los puntos Steiner, permitiendo realizar conexiones ortogonales de los usuarios hacia la red de distribución. El uso de las conexiones ortogonales en lugar de los tramos diagonales reduce la utilización del conductor, cabe recalcar que en algunos casos las conexiones siguen siendo diagonales, ya que por cuestiones de limitaciones del mapa o de la ubicación del usuario el modelo encontró dichos puntos de conexión como los más cercanos. Es importante mencionar que para el caso mostrado en la Fig. 4 se han tomado en consideración 486 usuarios, con la creación de 22 transformadores, que a su vez buscan conectarse entre sí para formar la red de media tensión, considerando los puntos Steiner para generar la ruta. Observando que la línea roja es la formación de la red de media tensión, los cuadrados morados nos muestran la ubicación del despliegue de los transformadores óptimos y a su vez se puede observar los puntos Steiner que son las extensiones de los usuarios para la conexión a la red que se encuentran graficados de distintos colores para denotar los distintos tipos de los circuitos de baja tensión.

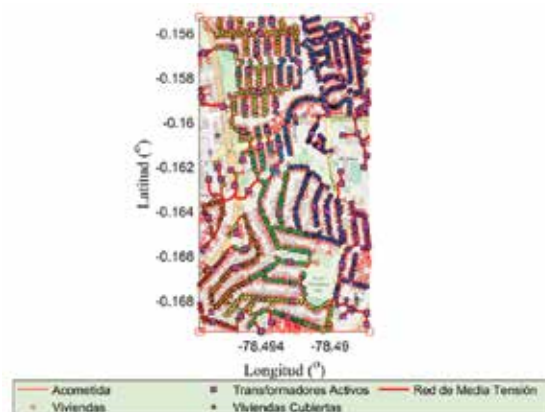
Fig. 4. PLANEACIÓN DE RED DE DISTRIBUCIÓN AÉREA CON PUNTOS STEINER



Fuente: Autores.

La Fig. 5 es un claro ejemplo de cómo la planeación puede ser escalada para grupos de usuarios variantes, diferentes tipos de mapas y en función a ello cambiarán el número de transformadores óptimos por ubicarse. Para lo que se plantea el uso de un nuevo mapa bajo las condiciones iniciales de 1483 usuarios; se advierte las variaciones en cuanto al ruteo de la red de media tensión y puntos Steiner creados, dado que en un distinto mapa los usuarios se encuentran bajo distintas coordenadas.

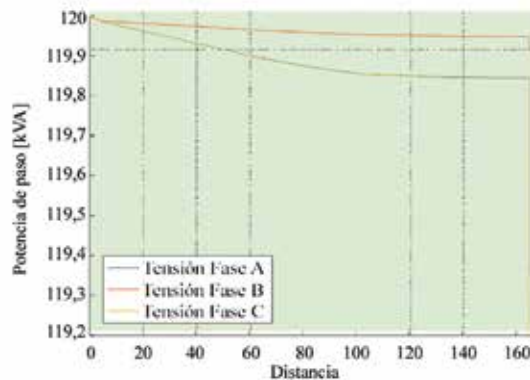
Fig. 5. PLANEACIÓN DE RED DE DISTRIBUCIÓN CON PUNTOS STEINER, 75 TRAFOS



Fuente: Autores.

Una vez obtenidas las directrices de la planeación, se procedió a la simulación utilizando el software Cymdist, allí se pudo visualizar de mejor manera el comportamiento de dicho sistema; con lo cual se analizaron varios parámetros técnicos, tal como se presenta en la Fig. 6, que es el resultado del perfil de voltaje, denotando que a mayor distancia la variación de voltaje va a ir decayendo conforme se vaya alejando de la fuente. Esta variación se puede observar en la red de bajo voltaje considerando el número de cargas que se conecta a cada fase.

Fig. 6. PERFIL DE TENSIÓN



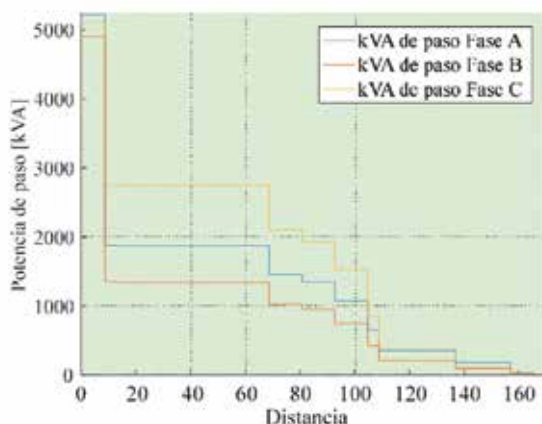
Fuente: Autores.

Otro de los resultados que se obtuvo fue el perfil en kVA que se observa en la Fig. 7, se puede interpretar como el comportamiento que tiene la potencia a lo largo de la distancia de recorrido, ya que nos permite visualizar la variación que esta presenta frente a las cargas conectadas a la red de distribución y de paso en cada fase, coincidiendo en similitudes con la

Fig. 6. En el que con el paso de la distancia los valores empiezan a decaer.

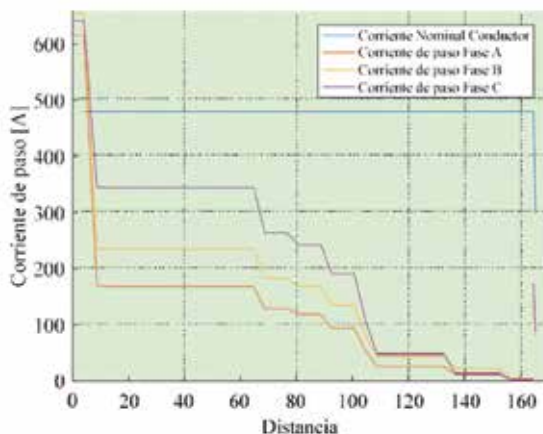
Una de las consideraciones principales de diseño es la corriente que circula por el sistema, ya que con esta se debe escoger los conductores que van a soportarla, es por ello que en la Fig. 8 se aprecia la corriente de circulación por los conductores obtenida en la simulación en el software Cymdist, observando un vínculo entre la corriente y la distancia desde la fuente hacia las cargas o usuarios.

Fig. 7. PERFIL DE POTENCIA EN kVA



Fuente: Autores.

Fig. 8. CORRIENTE DE PASO POR LOS CONDUCTORES VS. DISTANCIA



Fuente: Autores.

## CONCLUSIONES

La variación del crecimiento de la demanda de un sistema de distribución genera cambios en la planeación de un determinado lugar geográfico, delimitando la posibilidad de mantener creci-

mientos controlados de los usuarios; el presente trabajo brinda la oportunidad de analizar diferentes escenarios a los que se podría enfrentar una empresa distribuidora para poder implementar en la planeación futura del sistema.

El uso de un árbol de Steiner llega a ser más confiable en la búsqueda de un enrutamiento de menor costo, ya que, a diferencia de un árbol mínimo de expansión, este método inserta nuevos puntos con el fin de utilizar mejores rutas que disminuya la cantidad de conductor que se va a utilizar y por lo tanto minimizar el costo de implementación.

El uso de la plataforma OpenStreetMap proporciona una gran cantidad de información sobre aspectos geográficos y datos relevantes acerca de edificaciones emplazadas en una localidad, es de gran importancia poder filtrar y distinguir los datos para aprovechar al máximo los recursos obtenidos en la búsqueda para realizar una planeación, ya que así se evita errores que puedan producir un mal levantamiento de información, considerando la heterogeneidad de datos arrojados por la plataforma podrían alterar el rendimiento del algoritmo.

El algoritmo planteado permite optimizar los recursos que se van a utilizar en la construcción de las redes áreas de distribución; además de ubicar los sitios candidatos de instalación de los transformadores. De esta forma se obtiene una cobertura del cien por ciento de todos los usuarios.

## AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este documento ha sido producida gracias al apoyo del GIREI - grupo de investigación en Redes Eléctricas Inteligentes de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, bajo el proyecto de Planeación y Despliegue Óptimo de Redes de Distribución Eléctrica Aéreas y Soterradas.

## REFERENCIAS

- [1] K. Lin, X. Jing, Z. Hengjun, and W. Beibei, "Planning Method for Distribution Networks Based on Load Growth Characteristics of the Industry," *CICED*, pp. 10-13, 2016.
- [2] J. Fletcher, T. Fernando, H. lu, M. Reynolds, and S. Fani, "A case study on optimizing an electrical distribution network using a genetic algorithm," 2015 IEEE



- 24th Int. Symp. Ind. Electron, pp. 20-25, 2015.
- [3] G. A. Jiménez-Estevez, L. S. Vargas, and R. Palma-Behnke, "An evolutionary approach for the greenfield planning problem in distribution networks," *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, pp. 1744-1749, 2007.
- [4] V. Dumbrava, P. Ulmeanu, P. Duquenne, C. Lazarioiu, and M. Scutariu, "Expansion planning of distribution networks by heuristic algorithms," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2010.
- [5] E. G. Carrano, F. G. Guimarães, R. H. C. Takahashi, O. M. Neto, and F. Campelo, "Electric distribution network expansion under load-evolution uncertainty using an immune system inspired algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 851-861, 2007.
- [6] D. Deka, M. Chertkov, and S. Backhaus, "Structure Learning in Power Distribution Networks," *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 5870, no. c, pp. 1-1, 2017.
- [7] R. M. Capelini et al., "Methodology for Fast Location in Overhead Distribution Networks by Application of Temporary Georeferenced Fault Indicators," *2016 IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, pp. 6-9, 2016.
- [8] J. F. Gómez et al., "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 996-1004, 2004.
- [9] K. E. Antoniadou-Plytaria, N. C. Koutsoukis, E. S. Sergaki, and P. S. Georgilakis, "Multiyear power distribution planning considering voltage regulator placement," *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP711, pp. 1-6, 2016.
- [10] A. Samui, S. Singh, T. Ghose, and S. R. Samantaray, "A Direct Approach to Optimal Feeder Routing for Radial Distribution System," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 253-260, 2012.
- [11] V. F. Martins and C. L. T. Borges, "Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2164-2172, 2011.
- [12] M. Campaña, E. Inga, and R. Hincapié, "Optimal placement of universal data aggregation points for smart electric metering based on hybrid wireless," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 1950, pp. 6-9, 2017.
- [13] R. Wang et al., "A Graph Theory Based Energy Routing Algorithm in Energy Local Area Network," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3275-3285, 2017.
- [14] Y. Chen, S. Wang, J. Yu, W. Li, X. Shi, and W. Yang, "Optimal Weighted Voronoi Diagram Method of Distribution Network Planning Considering City Planning Coordination Factors," *2017 4th Int. Conf. Syst. Informatics*, no. Icsai, pp. 335-340, 2017.
- [15] H. Chunguang et al., "Distribution network island separation with distributed generation (DG) based on dynamic planning," *Proc. 2017 IEEE 2nd Adv. Inf. Technol. Electron. Autom. Control Conf. IAEAC 2017*, pp. 1767-1771, 2017.
- [16] J. Lichtinghagen, M. Sieberichs, A. Moser, and A. Kübler, "Medium voltage network planning considering the current network and geographical restrictions," *2017 6th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2017*, pp. 689-693, 2017.
- [17] E. Díaz-Dorado, J. Cidrás, and E. Míguez, "Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 879-884, 2002.
- [18] A. Peralta, E. Inga, and R. Hincapié, "Optimal Scalability of FiWi Networks Based on Multistage Stochastic Programming and Policies," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 9, no. 12, p. 1172, 2017.
- [19] E. Inga, S. Céspedes, R. Hincapié, and A. Cárdenas, "Scalable Route Map for Advanced Metering Infrastructure Based on Optimal Routing of Wireless Heterogeneous Networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 24, no. April, pp. 1-8, 2017.
- [20] J. Naor, D. Panigrahi, and M. Singh, "Online node-weighted Steiner tree and related problems," *Proc. - Annu. IEEE Symp. Found. Comput. Sci. FOCS*, pp. 210-219, 2011.
- [21] X. Han, J. Liu, D. Liu, Q. Liao, J. Hu, and Y. Yang, "Distribution network planning study with distributed generation based on Steiner tree model," *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, vol. 1, pp. 1-5, 2014.
- [22] L. P. Zhang, Z. X. Yang, Q. Y. He, and D. M. Cai, "Immune algorithm for minimal Steiner tree problems," *Int. Conf. Adv. Mechatron. Syst. ICAMEchS*, vol. 2017, Decem, pp. 110-115, 2018.
- [23] C. Wang, H. Liang, X. Geng, and M. Zhu, "Multi-sensor fusion method using kalman filter to improve localization accuracy based on android smart phone," *2014 IEEE Int. Conf. Veh. Electron. Safety, ICVES 2014*, pp. 180-184, 2015.