

**DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICAS  
SOTERRADAS USANDO MÉTODOS METAHEURÍSTICOS Y SIMULACIÓN**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICAS  
SOTERRADAS USANDO MÉTODOS METAHEURÍSTICOS Y SIMULACIÓN**

**AUTOR:  
ERMEL GIOVANNY SANTACRUZ CARCELÉN**

**DIRECTOR:  
ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA**

**Quito, febrero 2018**

Ermel Giovanni Santacruz Carcelén

**DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICAS  
SOTERRADAS USANDO MÉTODOS METAHEURÍSTICOS Y SIMULACIÓN.**

Universidad Politécnica Salesiana  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



[esantacruz@ups.edu.ec](mailto:esantacruz@ups.edu.ec)

**Ermel Giovanni Santacruz Carcelén** (Y'1983-M'10). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior “Los Shyris” en la especialidad de Físico - Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en infraestructuras de medición avanzada, redes inteligentes, optimización, planeación, operación y economía aplicada a redes de distribución aéreas y soterradas.

Dirigido por:



**Esteban Mauricio Inga Ortega** (Y'1976-M'08). Esteban Inga es investigador científico en la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito. En el año 2001 se gradúa de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca. En el año 2008 recibió su Maestría en Educación y Desarrollo Social por la Universidad Tecnológica Equinoccial, a inicio del año 2017 recibe su grado de Magíster en Ingeniería por la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín – Colombia y en Noviembre de 2017 obtiene su grado de Ph.D de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín – Colombia con mención de honor Magna Cum Laude otorgado cuando la tesis supera las expectativas de lo planteado en el proyecto, por concepto unánime de los jurados, y se demuestra producción científica. Es coordinador del grupo de investigaciones en redes eléctricas inteligentes de la Universidad Politécnica Salesiana, miembro activo de IEEE e investigador acreditado en el Senescyt.

[einga@ups.edu.ec](mailto:einga@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

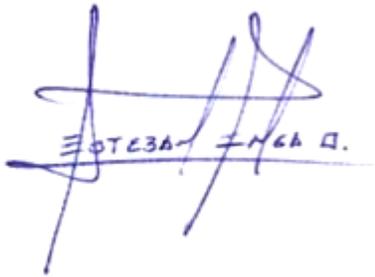
DERECHOS RESERVADOS  
Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

©2018

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Esteban Mauricio Inga Ortega declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Despliegue óptimo de redes de distribución eléctricas soterradas usando métodos metaheurísticos y simulación*” realizado por Ermel Giovanni Santacruz Carcelén, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero de 2018



ESTEBAN INGA O.

.....  
Esteban Mauricio Inga Ortega

Cédula de identidad: 0102116043

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Ermel Giovanny Santacruz Carcelén, con documento de identificación N° 1718415209, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado intitulado: “*Despliegue óptimo de redes de distribución eléctricas soterradas usando métodos metaheurísticos y simulación*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, febrero de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ermel Giovanny Santacruz Carcelén', written over a horizontal line.

.....  
Ermel Giovanny Santacruz Carcelén

Cédula: 1718415209

## 1. INDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Introducción.....	3
2. Planeación óptima de redes de electrificación soterradas de distribución.....	7
2.1 Topologías de las redes de distribución eléctrica.....	9
2.2 Modelos de Redes de Electrificación Soterrada para Distribución.....	10
2.3 Cobertura a las poblaciones georreferenciadas de redes de electrificación soterrada.....	12
2.4 Árbol de expansión con transformadores.....	12
3. Formulación del problema.....	12
4. Análisis de resultados.....	15
5. Conclusiones.....	19
6. Referencias.....	20

## 2. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Despliegue Óptimo de Redes de Distribución Eléctrica Soterrada bajo el concepto georreferenciado.....	6
Figura 2. Escenario de Óptimo despliegue de pozos de Inspección en redes de electrificación soterrada de distribución.....	8
Figura 3. Red de Electrificación Soterrada que suministra zonas residenciales derivadas de un alimentador lateral primario superior existente.....	10
Figura 4. Esquema Típico de Circuito de alimentador primario que suministra cargas comerciales, residenciales y pequeñas.....	11
Figura 5. Esquema Típico de Redes de Electrificación Secundarias alimentadas por varios alimentadores a través de unidades de red y redes secundarias entrelazadas.....	11
Figura 6. Matriz de distancias representada en escala policromática.....	16
Figura 7. Escenarios con una densidad poblacional de 64.....	17
Figura 8. Relación Número de usuarios vs Número de transformadores óptimos.....	17
Figura 9. Relación Número de usuarios vs Número de pozos de inspección.....	17
Figura 10. Comportamiento del Rendimiento de CPU.....	18

Figura 11. Escenario Perfil de Tensión ..... 18  
Figura 12. Escenario Hueco de Tensión definido por sus características. .... 18  
Figura 13. Comportamiento Corriente de Cortocircuito ..... 19

**3. INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Notaciones..... 14  
Tabla 2. Parámetros iniciales ..... 15

# DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICAS SOTERRADAS USANDO MÉTODOS METAHEURÍSTICOS Y SIMULACIÓN

## Resumen

Este documento presenta un modelo de planeación que permite optimizar el despliegue de redes de electrificación soterradas para distribución considerando la cantidad de usuarios conectados simultáneamente a un transformador. Se presenta un modelo basado en un proceso heurístico que busca reducir costes por uso de recursos requeridos para un enrutamiento de mínimo costo sobre un escenario georreferenciado. El modelo es escalable pues permite que se varíe la densidad poblacional del área georreferenciada estudiada, es decir, se ajusta al uso de recursos requeridos para diferentes cantidades poblacionales. Adicionalmente se presenta un proceso de simulación articulado al modelo de planeación mediante el software Cymdist, contemplando elementos de una red de electrificación soterrada real, con la finalidad de verificar problemas de tensión, fallos, sobrecargas, etc. Los resultados obtenidos permiten diagnosticar rápidamente las posibles opciones de despliegue y enrutamiento de redes soterradas para distribución, advirtiendo disminuir los tiempos por despliegue de nuevas redes, además el trabajo explora con éxito el principio de optimalidad y hace que el proceso heurístico sea computacionalmente útil. Finalmente, la propuesta brinda un mapa de ruta con visión hacia la óptima planeación de redes de electrificación soterradas para distribución.

## Abstract

This document presents a planning model that allows optimizing the deployment of underground electrification networks for distribution considering the number of users simultaneously connected to a transformer. We present a model based on a heuristic process that seeks to reduce costs by using the resources required for a minimum cost routing on a geo-referenced scenario. The model is scalable because it allows the population density of the studied georeferenced area to be varied, that is, it adjusts to the use of resources required for different population quantities. Additionally, a simulation process is presented, articulated to the planning model using the Cymdist software, contemplating elements of a real underground electrification network, in order to verify voltage problems, failures, overloads, etc. The obtained results allow to quickly diagnose the possible deployment and routing options of underground networks for distribution, warning to decrease the times for deployment of new networks, in addition the work successfully explores the optimality principle and makes the heuristic process computationally useful. Finally, the proposal provides a road map with a view to the optimal planning of underground electrification networks for distribution.

***Palabras Clave:*** Costos, Despliegue, Heurística, Optimización, Planificación, Recursos. ***Keywords:*** Costs, Deployment, Optimization, Planning, Resources.

## 1. Introducción

Las redes de electrificación soterradas en distribución hoy en día se han constituido en una necesidad por diversos factores, uno el impacto visual que este tipo de redes generan sobre su entorno o dos por necesidades técnicas de las instalaciones mismas; de hecho, las redes subterráneas o soterradas están mejor protegidas de los elementos de la naturaleza y otros daños externos que los modelos de redes de electrificación aérea; sin embargo, los innumerables beneficios se contraponen con el alto coste para su emplazamiento. Es importante apreciar que modelos de planeación óptima para el despliegue de redes de electrificación modernas están permitiendo mejorar los entornos y condiciones de seguridad de las actuales metrópolis y esto a su vez está permitiendo que empresas de distribución y autoridades busquen nuevos modelos de planeación óptima para también repotenciar redes de electrificación existentes en zonas geográficamente pobladas [1], [2].

El planeamiento de redes de electrificación en distribución puede parecer un problema trivial, sin embargo; el aumento exponencial de demanda eléctrica [3], [4] implica consideraciones de ingeniería y optimización.

Este trabajo presenta, un modelo de planeación óptima para despliegue de redes electrificación soterrada de distribución basados en un proceso heurístico que minimiza los costos por uso de recursos y que adicional a lo presentado por [5], [6], incorpora una interconexión de recursos requeridos para un enrutamiento de mínimo costo sobre el escenario georreferenciado; posteriormente a partir de simulación se advierte el comportamiento de distintos escenarios con diferentes cantidades de usuarios conectados simultáneamente a un transformador y con distintas densidades poblacionales así como

también se analizan los flujo de potencia, fallos, balances de carga, distribución y estimación de cargas, situación innovadora para este tipo de cálculos [7].

Por lo tanto, el modelo de planeación óptimo requiere una infraestructura de red necesaria para dar cobertura eléctrica a un sin número de usuarios o abonados considerando capacidad. Para la cual dispondremos de un conjunto de sitios candidatos para transformadores  $S$  para brindar cobertura a  $N$  viviendas, sujeto a restricciones de cobertura tomando en cuenta la cantidad de usuarios conectados simultáneamente a un transformador. Cuando citamos capacidad en el modelo de planeación óptimo para redes de electrificación soterrada manifestamos que se presenta una alta complejidad debido a que es preciso simplificar parámetros del modelo de planeación propuesto, únicamente con el firme propósito de brindar cobertura eléctrica al 100 % de los usuarios [8].

De la misma manera, el presente modelo de planeación óptima para el despliegue de redes de electrificación soterrada para distribución tiene como uno de sus principales propósitos asegurar que el crecimiento de la demanda eléctrica en el lado de los consumidores o usuarios sea escalable en el tiempo [9]; es decir, sea satisfecha mediante el reforzamiento de las redes de distribución; asegurando los requerimientos técnicos y económicos de la red eléctrica, con la finalidad de minimizar los recursos asociados a su uso [10].

Por otra parte, no debemos ignorar que la naturaleza del problema incluye criterios técnicos tales como; restricciones de caída de tensión y radialidad [11]–[14], donde muchos trabajos las ignoran. Aun así, el conjunto formado por estas restricciones tiene vital importancia desde el punto de vista de la ingeniería práctica. También, dentro del horizonte de planeación se

considera la carga máxima admisible de subestaciones, es decir; que las restricciones de cargabilidad se respeten para estar en un margen aceptable. Los límites térmicos de transformadores, restricciones de líneas y conductores. Además, debido a consideraciones de fiabilidad, las subestaciones deberían tener menos carga que su capacidad nominal.

Si bien es cierto, en la formulación del problema se incluyen ciertas restricciones con naturaleza no lineal, el modelo propuesto tiene una característica combinatoria con restricciones lineales [15]. De hecho, en ciertos trabajos los investigadores para dar solución a sus modelos comúnmente se inclinan por propuestas de programación lineal entera, mixtas, cuadráticas, dinámicas, entre otras, variantes de algoritmos, variantes de procedimientos Branch and Bound, y en los últimos tiempos se están utilizando algoritmos evolutivos en unos casos y sistemas expertos en otros casos [16]–[18].

Para exponer el presente modelo se ha trazado tres fases de ejecución que garanticen el objetivo de minimizar los costes relacionados por los recursos empleados, en la primera fase se considera la cobertura, posteriormente en la segunda fase se enmarca el problema de la cantidad de usuarios conectados simultáneamente a un transformador y finalmente la última fase corresponde al óptimo despliegue de una red soterrada para distribución de energía eléctrica, sirviéndose de un mínimo árbol de expansión (MST), con la que será posible crear un red eléctrica soterrada de distribución optimizada [19], [20].

Previamente se han denotado diversas metodologías para solventar el dilema de un óptimo despliegue y enrutamiento de redes, sistemas o líneas de distribución eléctrica tomando en cuenta la cobertura en simultaneo a los

abonados del sistema de distribución; es decir, en la primera fase se incluyen algoritmos como Dijkstra tratando de buscar la ruta más corta entre enlaces sin que involucren la capacidad; otros proponen modelos basados en eficiencia energética, limitando la cantidad de equipos que se pudiesen ubicar según una estimación sin que sea óptima la escalabilidad. Incluso mediante el algoritmo de Greedy que busca las soluciones más cercanas a la óptima, cabe mencionar que este presenta dificultades en territorios dispersos tales como áreas rurales [21], [22]

Para implementar las subsiguientes fases del modelo planteado, los algoritmos previamente utilizados por otros investigadores están relacionados a problemas de optimización con programación lineal que permite incluir la ecuación que será optimizada y sus respectivas restricciones resueltas en el marco de MILP para lograr minimizar costes por recurso empleado, modelos que pueden ser resueltos por solvers como LPSolve (MIT-Libre) y GAMS (Licencia). Varias son las restricciones previamente empleadas para minimizar la cantidad de transformadores de un conjunto de casas de la red bajo el entorno soterrado, las distancias, la arquitectura de red y las barreras técnico-operativas conforman la naturaleza de un modelo de red de electrificación soterrada [23], [24].

El presente modelo de planeación óptimo para el despliegue de redes electrificación soterradas de distribución se enfoca en áreas urbanas y modela el mapa vectorial en un escenario georreferenciado. La topología de las calles se toma en cuenta compilando las coordenadas de las intersecciones y las viviendas en un gráfico único no orientado.

Para realizar el óptimo despliegue de redes de distribución eléctrica soterradas, en este trabajo se implementará un algoritmo basado en

Dijkstra para el enrutamiento de nuestra red eléctrica. El algoritmo Dijkstra proporcionará la ruta más corta para precisar la distancia a través de los nodos  $i \rightarrow j; \forall i, j$  en el despliegue de la red de electrificación soterrada de distribución propuesta [25] se obtendrá las rutas óptimas como parte de una planeación óptima de redes de distribución soterradas, este modelo de planeación heurístico es muy flexible por naturaleza y robusta en minimizar los costos por uso de recursos requeridos con un enrutamiento de mínimo costo sobre el escenario georreferenciado.

También, el modelo propone la ubicación óptima de transformadores de distribución por lo que se recurre a proponer una heurística bajo el problema de Steiner Tree que permita la conectividad, para la ubicación óptima se considera la calles y sus intersecciones en una metrópoli urbana previamente establecida; de esta manera se garantizara la no existencia de cruces en los diferentes enlaces de la red de distribución soterrada [26]–[28]. Los árboles Steiner representan una óptima solución para los algoritmos de mínimo árbol de expansión (MST).

El modelo de planeación óptimo propuesto plantea escenarios con 32, 64, 128, 256 y 512 número de usuarios o abonados y con capacidades de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 usuarios conectados simultáneamente a un transformador, todo esto en la búsqueda de óptimas soluciones para el despliegue de redes de electrificación soterrada de distribución. El algoritmo de Prim de MST (árboles generadores mínimos) es tal vez una de las metodologías más sencillas de implementar y el mejor para grafos muy densos. Así mismo este algoritmo puede ubicar el MST de cualquier grafo conexo considerando pesos, puesto que dicho algoritmo considera los nodos existentes, de manera tal que todos se interconecten con los mínimos pesos de enlace consiguiendo que el árbol generado

recorra la mínima distancia para llegar al nodo o vértice unión, al aplicar el algoritmo de Prim en nuestro modelo podremos encontrar la ruta óptima para ahorrar recursos de cableado [29].

En el modelo de planeación óptimo propuesto los transformadores tienen características especiales, que si se despliegan de manera óptima en la red de electrificación soterrada de distribución permitirá dar cobertura eléctrica al 100 % de los usuarios de la red optimizada; por ello, la facilidad que está ofreciendo la administración de doctrinas informáticas y posicionamiento global geográfica (GIS, [Geographic Information System]) con los que se obtiene mejorar la precisión en planeación y gestión, suponiendo un progreso significativo en técnicas de optimización y haciendo que la presente propuesta sea muy atractiva [30], [31].

De hecho, los llamados sistemas GIS son útiles para que empresas de servicios públicos realicen modelos de planeación óptimos para desplegar redes de electrificación que para nuestro estudio es soterrado.

Nuestro modelo de planeación considera métodos de clusterización iniciales, despliegue y búsqueda que nos permitirán realizar una heurística que minimice los costos por uso de recursos en el despliegue de redes de electrificación soterradas de distribución, que en primer instante minimice la cantidad de posibles sitios candidatos para transformadores de distribución desplegados en un área finita, es importante mencionar que se, considera la matriz de conectividad y los nodos de intersección para que la topología MST ayude a mejorar el despliegue de una red de electrificación soterrada propuesta, introduciendo la idea fundamental de un enrutamiento de mínimo costo sobre un escenario finito georreferenciado. El servirse de este modelo permitirá gestionar de mejor manera la conectividad de enlaces desde

uno nodo  $i$  a un nodo  $j$ , ayudándonos a reducir el dilema de recursos utilizados en el óptimo despliegue de redes de electrificación soterradas. Sin duda, en futuros trabajos se podrá estudiar de manera mucho más detallada el efecto económico de modelos de planeación

óptima para despliegue de redes de electrificación soterradas con las características ya anteriormente mencionadas, de manera tal que bien pueda ser aplicable a cualquier área u condición.

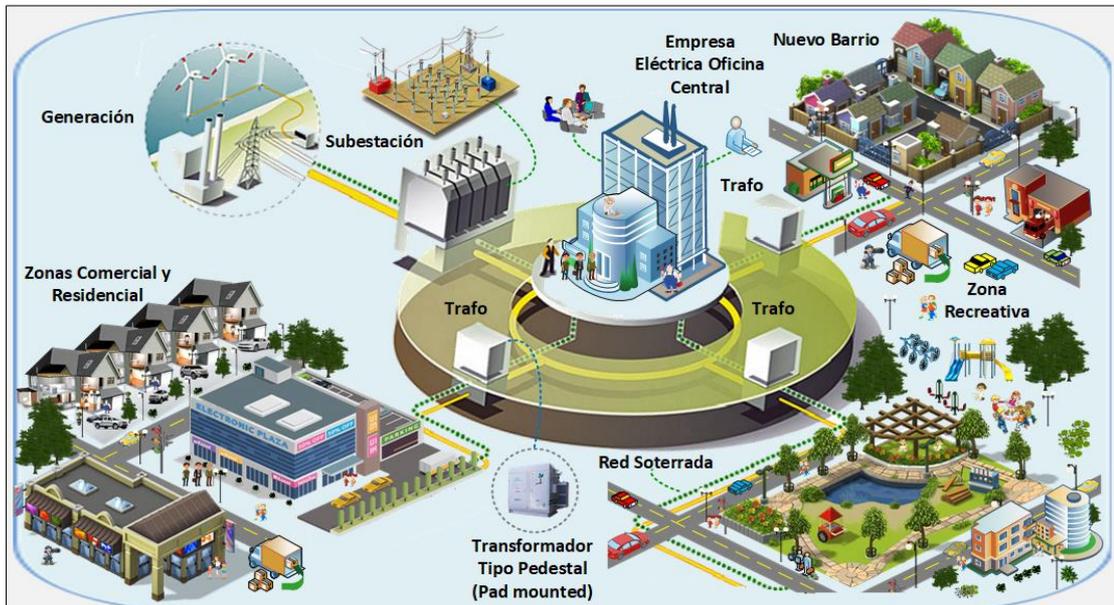


Figura 1. Despliegue Óptimo de Redes de Distribución Eléctrica Soterrada bajo el concepto georreferenciado

En el documento [32] los investigadores plantean técnicas de diseño y despliegue de redes de distribución que abarcan la óptima disposición de nuevas S/E (subestaciones) y recorrido alimentadores nuevos.

El principal objetivo es poder entregar un modelo de planeación óptima que permita realizar el despliegue de redes de electrificación soterradas de distribución, basándose en la cantidad de usuarios conectados simultáneamente a un transformador como restricción.

Entonces, mediante la presente propuesta, solventaremos la problemática de planeación, la cual consistirá en realizar un despliegue óptimo de redes de electrificación soterrada de distribución en un área finita minimizando los costos por recurso empleado garantizando la cobertura en cuanto al servirse de electricidad se refiere [17], brindando el

máximo de cobertura a un escenario específico. El servirse de sistemas considerados híbridos en [20] nos permitirán minimizar considerablemente los costes por implementar redes de electrificación soterrada mediante el despliegue óptimo de redes soterradas de distribución.

Para validar y con la finalidad de entregar un modelo mucho más ajustado a la realidad se simuló la red de electrificación soterrada optimizada, para ello se nos servimos de herramientas computacionales como Matlab y Cymdist, y que nos ayudaron a presentar un análisis técnico de la red. Se pretende realizar la interconexión de recursos en un escenario georreferenciado para evaluar flujos de potencia, análisis de fallas, balances de carga y finalmente evaluar la distribución y evaluación de cargas, y así se pueda comprobar perfiles y caídas de tensión, con qué frecuencia ocurren

caídas de tensión, perfiles de corriente en cortocircuito, capacidad nominal en corriente de conductores subterráneos y finalmente los fallos de corriente en puesta de trabajo. Para modelar los flujos se considera: máxima demanda por usuario, tipos de usuario, factores de potencia para cada usuario, datos de los transformadores, tensión nominal en el lado del primario como del lado secundario, restricciones de tensión, características de conductores utilizados para soterramiento (*R*, *X* y *corrientes admisibles*), longitudes por tramo de red, etc.

En adelante este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección II se introduce los requisitos fundamentales para planear redes de electrificación soterradas de distribución, el cual es el objeto de estudio del presente documento. En la sección III se describe la formulación del problema a través del modelo planteado. En la sección IV se analizan los resultados de la modelización y simulación. Finalmente nosotros concluimos este artículo en la sección V.

## **2. Planeación óptima de redes de electrificación soterradas de distribución**

En literatura especializada se menciona que existen tres tipos de diseño y/o planeación de redes de electrificación para distribución: (a) de construcción nueva, (b) para expansión y (c) por operación sean estas por aire o por debajo de suelo [33], [34].

Indistintamente, de que se examine una red de distribución eléctrica aérea o soterrada, las redes de distribución no son tarea muy sencilla, pues se deben contemplar diversos obstáculos importantes, incluidas las limitantes técnicas y las ambientales, sin embargo, en la actualidad por cuestiones de ingeniería práctica el diseño y planeación de sistemas o redes eléctricas

de distribución ajustadas a necesidades propias de una zona o área a la cual se esté suministrando energía son en su gran mayoría de tipo radiales [23], [35], [36]. Desafortunadamente, no cualquier tipo de red eléctrica puede ser empleada técnica y económicamente hablando y sí se consideran los factores en función de la zona donde esta circule, es decir, que el despliegue de las redes de distribución a planear en una zona geográficamente constituida pudiese ser una de tipo aérea o tipo subterránea o soterrada.

El despliegue, planeación, conexión he incluso las protecciones de sistemas de distribución eléctrica tradicionalmente han sido de tipo aéreo. Estos estéticamente son desagradables a la vista, pero permiten que las empresas distribuidoras de electricidad proporcionen una dosis de energía a mínimo coste. De hecho, la propagación rápida de proyectos inmobiliarios o de vivienda han hecho que el soterrado de redes eléctricas estén ganando interés. El móvil por su puesto, estas reportan varios beneficios, tales como mayor seguridad para la población, mayor protección contra elementos de la naturaleza, además de adornar la apariencia estética de metrópolis (zonas residenciales o centros históricos) [37], [38].

La energía distribuida de forma soterrada es utilizada por las compañías de distribución eléctrica en áreas donde los sistemas aéreos no son aceptables debido a limitaciones urbanísticas, estéticas o sencillamente por seguridad. De hecho, existen muchas maneras de diseño, construcción y operación de redes eléctricas soterradas satisfactorias, pero la óptima planeación de sistemas subterráneos o soterradas requieren personas con cierta experticia y con destreza en el manejo de métodos analísticos y de ingeniería únicos. Al comparar las desventajas respecto a una red aérea son los costes elevados; de hecho, se ha citado anteriormente que los

sistemas soterrados eléctricos presentan bondades que hacen que los beneficios sean mayores indistintamente de poseer una alta inversión en comparación a las redes tradicionales. Como se puede inferir las redes soterradas brindan disminución de costes por mantenimiento y operación, además que reduce las pérdidas causadas por conexiones ilegales o clandestinas.

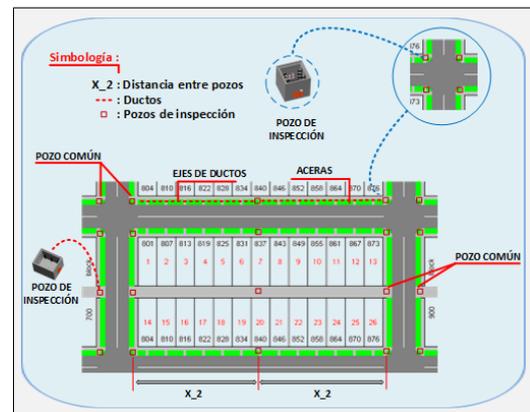
Para la óptima realización de una red eléctrica de distribución tipo soterrado es importante mencionar que este sistema comprende de: una obra civil, que está compuesta de ductos, pozos, cámaras eléctricas y cimentación de concreto para ubicación de equipos; una obra eléctrica; un equipamiento, sus accesorios; terminales de cables y conductores, etc. [37] Finalmente, como criterios de planeación se considera aspectos como: la seguridad; refiriéndose a profundidades mínimas permitidas, aislamiento de conductores, selección de materiales, diseños y construcción de líneas de distribución soterradas eléctricas, calidad de servicio; debiendo estipular los niveles tensión eléctrica, la corriente tanto en intensidad como en cortocircuito, aumento térmico y condiciones ambientales y mecánicas de instalación y trabajo, frecuencia, continuidad y confiabilidad, la parte económica; refiriéndose a la vida útil, el óptimo enrutamientos de líneas, la optimización de pérdidas y expansión finalmente [39], [40].

Ha habido un déficit general de literatura revisada por pares que identifican métodos para estimar costes vs beneficios de las maniobras implementadas por las compañías eléctricas para desarrollar la planeación de redes de electrificación soterradas en distribución por eso es importante mencionar los criterios técnicos que se aplican para el planeamiento y construcción en redes de electrificación soterrada, esto con el propósito de obtener información relevante para el

desarrollo urbanístico y las mismas se denotan a continuación:

Las canalizaciones de redes de electrificación soterrada deberán estar construidos por un cumulo de ductos para instalaciones eléctricas y con tuberías de PVC rígidas.

Los pozos de registro serán utilizados cuando exista una transición de una red aérea a una red soterrada, también cuando exista intersecciones, también en la ruta de circuitos con tramos muy largos. La distancia entre pozo y pozo dependerá de la planeación y/o diseño, así mismo estas deberán construirse antes o después de cámaras eléctricas, según la distancia del tramo y arquitectura del terreno pues desde allí se efectuarán las respectivas acometidas.



**Figura 2.** Escenario de Óptimo despliegue de pozos de Inspección en redes de electrificación soterrada de distribución.

En el plano constructivo se tienen se tienen dos tipos cámaras subterráneas: Las cámaras denominadas de seccionamiento que internamente pueden tener componentes necesarios para realizar transferencias, conexiones o desconexiones de cargas, adicionalmente estas pueden albergar internamente uno o más transformadores.

Las cámaras denominadas de transformación, este tipo de cámaras albergan transformadores junto a los elementos adicionales. Pero como principales características las cámaras podrán servir en BT hasta 4 manzanas y

si poseen más de dos salidas en BT necesitarán tableros de distribución con sus respectivos dispositivos de protección, de hecho, las cámaras, deben contemplar entre otros aspectos, la estética, seguridad, operatividad y la necesidad eléctrica [41].

Para protección y seccionamiento de equipos normalmente se emplean: celdas de MT aisladas en hexafluoruro de azufre o SF<sub>6</sub>, estas son exclusivamente diseñadas para conexión, desconexión y distribución de energía hasta 38 kV y 630 amperes a 60 Hz; interruptores para redes soterradas; conectores aislados separables. Con referencia a redes secundarias se recomienda emplear tableros trifásicos de distribución, aislados en aire, con disyuntores termomagnéticos de varios amperes de trabajo [40]

Finalmente, los conductores eléctricos en redes soterradas de distribución para medio o bajo voltaje deberán ser monopolares de cobre, para medio voltaje el nivel de aislamiento deberán ser 100 y 133% XLPE o polietileno reticulado termoestable o también TRXLPE o polietileno reticulado retardante a la arborescencia, y el aislamiento dependerá de la tensión en red, por ejemplo 15 kV, 25 kV y 35 kV, y para redes secundarias soterrada el aislamiento deberá ser 2000 V con PE o polietileno y chaquetas PVC que soporten espacios húmedos [42], [43].

## **2.1 Topologías de las redes de distribución eléctrica**

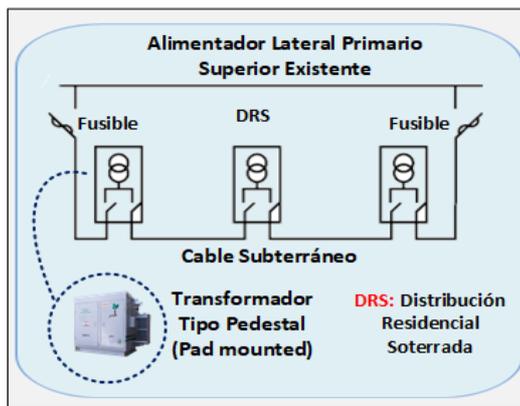
Sin duda, lo primero que se debe considerar para una óptima planeación de redes de distribución son los tipos de distribuciones que existen, tanto en MV (Media tensión) como en LV (Baja tensión). Dependiendo de la envergadura y capacidad de servicio que proporcionarán. Las estructuras básicas en términos generales tenemos a las radiales, anillo y malladas o selectivas. De hecho, en tensiones bajas la

configuración siempre será radial, porque el flujo circula unidireccionalmente hacia los receptores, aunque pueden existir variantes dependiendo necesidades específicas [44]–[48]. Además, para buscar una topología de despliegue radial con mínimo coste y teniendo en cuenta el tamaño del transformador MT/BT, el enrutamiento de las redes BT, el límite térmico y el nivel de tensión permitido para suministrar a los consumidores son problema de planeación de una red de distribución de BT (Baja Tensión).

Para lograr una óptima planeación bajo la valoración de redes de distribución soterrada, es necesario conocer la carga a servir (abonado), es decir podemos ubicarlas en un rango de uso energético siendo así tendríamos los siguientes usos: cargas residenciales ubicados geográficamente en zonas urbanas o rurales; cargas comerciales en área céntricas, centros e inmueble comerciales; cargas industriales grandes y pequeñas [49]. Esto denota que cuan mayor sea la zona por densidad de carga, la red deberá ser mucho más fiable [50]. Los clientes residenciales suelen recibir servicio 240/120V de las redes de distribución locales. Su uso tiende a estar ligado a cargas sensibles a temperatura ambiente y siguen un horario similar de alta demanda en las primeras horas como en las noches y una demanda más ligera en medio día [51], [52].

La fig. 3 ilustra una red de electrificación soterrada que suministra áreas residenciales derivadas de un alimentador lateral primario existente. Su circuito primario funciona como un circuito normalmente abierto (NA) y los circuitos laterales primarios están conectados en cada transformador; es decir, hay dos conexiones principales de cable a cada transformador. Si se produjese un fallo de cable esta configuración, la localización y el aislamiento de la falla se pueden realizar

fácilmente para reestablecer el servicio rápidamente al 100 % de los abonados en las partes no afectadas del bucle primario. El corazón de la red de electrificación es el transformador y su carcasa, donde generalmente se instalan las conexiones de cables principales con sus equipos de seguridad. Estas redes de electrificación se pueden visualizar en metrópolis donde por cuestiones estéticas o técnicas se hace necesaria su implementación.



**Figura 3.** Red de Electrificación Soterrada que suministra zonas residenciales derivadas de un alimentador lateral primario superior existente.

El despliegue óptimo de los transformadores en una red de electrificación soterrada de distribución son los componentes clave; las conexiones de cables principales y el equipo de seguridad están hospedados en el gabinete del transformador.

Los clientes industriales se pueden definir por función o escala en demanda eléctrica. Generalmente son abonados que consumen abundante energía y debes en cuando, requieren instalaciones dedicadas directamente desde una subestación. Las llamadas cargas industriales suelen ser bastante constantes durante las 24h00 y anualmente si las comparamos con las cargas comerciales y residenciales.

Los clientes comerciales se hallan entre residencial e industrial puesto que pueden servirse de tensiones de 120V, 220V, 440V en conexiones: Monofásicas, Bifásicas y Trifásicas. Este

tipo de cargas eléctricas se las puede denotar por ejemplo en oficinas, restaurantes, farmacias, talleres, etc. Los pequeños comercios pueden usar menos electricidad que un hogar promedio o un inmueble de oficinas puede usar tanto como algunos una industria pequeña [53].

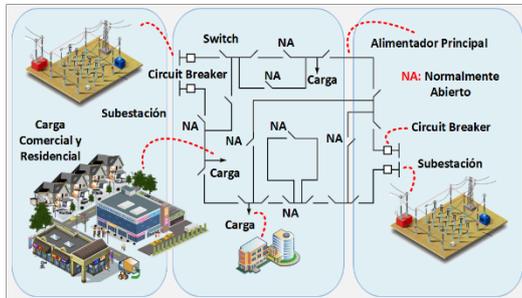
## 2.2 Modelos de Redes de Electrificación Soterrada para Distribución

Las redes de electrificación se las aborda en dos subsistemas de planeación: la red primaria (MV) y la red secundaria (BV), siendo la red primaria (MV) la encargada de transportar la energía entre las S/E y los transformadores de distribución, mientras que la red secundaria (BV) es el enlace final con los abonados.

Los circuitos de distribución, sean estos los primarios (medio voltaje) o los secundarios (bajo voltaje), presenten algunas características que las diferencian de redes para transmitir altos voltajes; arquitectura radial, conexiones múltiples, distinta naturaleza de cargas, etc. [54].

Las redes primarias de distribución saldrán de las subestaciones hacia los sitios previstos que se realizará la transición de red aérea a soterrada, desde allí lo que denomina troncal de media tensión se derivará a la red soterrada hacia las cámaras, la red será a niveles de tensión de entre 6.3 kV a 22,86 kV [11], [55]. Los alimentadores principales funcionan como circuitos radiales, pero con vínculos normalmente abiertos a los alimentadores adyacentes. Debido a que es difícil realizar trabajos de mantenimiento y operación en una red soterrada mientras se encuentre energizada se deben incorporar interruptores seccionados especiales. Las protecciones del alimentador principal son generalmente interruptores de interrupción de carga de funcionamiento manual clasificados en el rango de amperes.

Cabe citar que las redes de electrificación soterrada de distribución operan radialmente, pero con conexiones normalmente abiertas (NA) a los alimentadores adyacentes. Los circuitos laterales también funcionan NA.



**Figura 4.** Esquema Típico de Circuito de alimentador primario que suministra cargas comerciales, residenciales y pequeñas.

Los circuitos laterales son monofásicos o trifásicos, funcionan como bucles NA con una intensidad nominal de algunos cientos de amperes; Se utilizan interruptores de carga o conectores de cable aislados separables. La protección contra sobrecorriente de la red de electrificación soterrada de distribución se proporcionará en dos fases o etapas dependiendo del sitio de fallo: (a) un fallo de cable primario se borra mediante la operación del interruptor de circuito del alimentador en la S/E; y (b) los fusibles cortan fallas en los circuitos laterales.

En zonas metropolitanas, los alimentadores primarios generalmente son circuitos radiales emplazados en ductos subterráneos. Suministran energía desde los transformadores de distribución a numerosos puntos de una red de cables de BV interconectados (red secundaria).

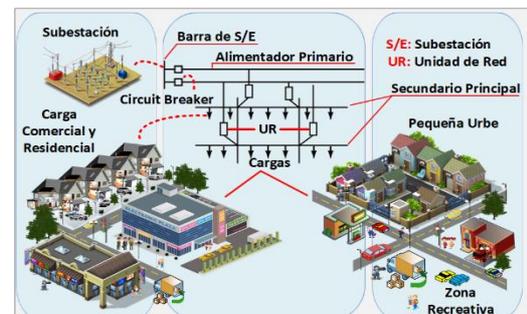
Las redes secundarias de distribución son el último peldaño en las redes eléctricas, de ahí que un erróneo planeamiento de este ejemplo de circuitos pudiese ocasionar sobrecargas en los circuitos y transformadores de distribución, problemáticas de regulación, desbalance de carga en fases, altas pérdidas técnicas en las redes,

pérdidas de fiabilidad, calidad o continuidad [8], [56].

Para evitar estos inconvenientes al planear redes de electrificación de distribución secundaria, se considera un diseño que involucre aspectos tales como: clasificación de transformadores, conductores eléctricos a utilizar, caídas de servicio al consumidor en sección transversal. Además, la tensión de entrada debe mantenerse en los límites permitidos, así también como ubicación y capacidad de nuevos tramos y transformadores de red secundarias. La red se modela de manera trifásica, sin embargo pudiesen existir monofásicas, bifásicas y trifásicas [12].

Los abonados que se suelen abastecer de un alimentador secundario o BV son por lo general de cargas desbalanceadas, debido a que estos usuarios (residenciales, comerciales) suelen poseer conexiones monofásicas. El nivel de voltaje de servicio de la red secundaria es del orden de algunos cientos de voltios que suministran cargas a tiendas, hoteles, restaurantes, edificios de oficinas, edificios de apartamentos y, en algunos casos residencias individuales con una densidad de carga promedio de algunos kVA por kilómetro cuadrado.

La fig. 5 Muestra un bosquejo esquemático de un pequeño segmento de una red de electrificación secundaria, que es suministrado por varios alimentadores primarios conectados a una S/E y adecuadamente entrelazados.



**Figura 5.** Esquema Típico de Redes de Electrificación Secundarias alimentadas por varios alimentadores a través de unidades de red y redes secundarias entrelazadas

### 2.3 Cobertura a las poblaciones georreferenciadas de redes de electrificación soterrada

El despliegue requerido para cada transformador deberá tomar las coordenadas de varias casas de forma tal que los enlaces sean óptimos y no se deban desplazar distancias excesivamente extensas. Uno de los principales enfoques es emplear ubicaciones georreferenciadas para los elementos eléctricos que se vaya a colocar, por lo tanto, la fórmula de Haversine es de mucha utilidad en el cálculo de distancias georreferenciadas entre dos ubicaciones (latitud, longitud); es decir, la fórmula de Haversine nos proporciona la distancia entre 2 puntos georreferenciados sobre la superficie del planeta ignorando elevaciones, colinas, etc. y que emplea como base de cálculo el Sistema Geodésico Mundial WGS84 . Se ha planteado una capacidad  $C$  que albergue hasta  $N$  casas (usuarios o abonados) y una cantidad de  $M$  sitios factibles donde se puedan ubicar los transformadores [57].

### 2.4 Árbol de expansión con transformadores

Para resolver el problema de despliegue y enrutamiento, en este trabajo se plantea un árbol de mínimo costo para interconexión de subestaciones, transformadores, pozos de revisión y casas todo esto se resuelve por medio de una metaheurística MST que se basa en el uso del algoritmo de Prim. Lo mencionado permite que la conexión se pueda realizar entre los elementos eléctricos del sistema, es decir, subestación, transformador y casas o clientes; minimizando recursos por cableado eléctrico empleados, objetivo del presente trabajo [58]–[61]

En cuanto a la propuesta de Minimal Spanning Tree MST, primeramente, se advierte la formación correspondiente de un grafo  $G$  que contenga todos los vértices  $V$  y todas las conexiones  $E$  entre

el  $i$ -ésimo y el  $j$ -ésimo pares de vértices que en el modelo representan los transformadores  $G(V, E, X_{i,j})$ . Cada conexión posee un peso específico  $X_{i,j}$  que agradece al recorrido existente entre transformador y transformador [20], [21], [62], [63].

En cuanto, a metodologías como la de Prim-MST o de Kruskal-MST se puede determinar el enrutamiento óptimo para el despliegue e interconexión minimizando el trayecto o distancia representada y que ciertamente nos permita reducir costes por recurso empleado [64]–[67].

Según [68], [69], la evolución del algoritmo de Prim es la siguiente:

---

<b>Paso 1:</b>	<b>Ingreso:</b> El grafo con los nodos o vértices $V$ y las conexiones $E$
<b>Paso 2:</b>	<b>Inicializa:</b> Para todo $x \in V$ Haga un $V_{nuevo} = \{x\}$
<b>Paso 3:</b>	<b>Elegir:</b> Aristas $u, v$ con $D_{u,v}$ que sea el mínimo costo tal que $u$ sea $V_{nuevo}$ y $v$ no pertenezca a $V_{nuevo}$
<b>Paso 4:</b>	<b>Salida:</b> Vincular $v$ a $V_{nuevo} = (u, v)$ a $E_{nuevo}$ ; creando el Minimal Spanning Tree

---

## 3. Formulación del problema

Para solventar el problema de planeación óptima propuesto, se plantea una heurística basada en un proceso que permita minimizar los costos por uso de recursos requeridos para un enrutamiento de mínimo costo sobre un escenario georreferenciado de una red de electrificación soterrada para distribución. La capacidad para acoger a los usuarios (viviendas) en cada transformador de distribución es variable, los escenarios presentados corresponden a capacidades de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 para fines explicativos; la distancia mínima permitida para cada transformador también puede ser modificable para determinar las condiciones que minimizan los costos

por uso de recursos y por consiguiente de esta forma solventar el problema de planeación.

El modelo de planeación parte de un escenario georreferenciado que tiene asignado las coordenadas de los usuarios para el despliegue de la red de electrificación soterrada, así como también las correspondientes coordenadas latitud, longitud de cada transformador. Para determinar las distancias en el escenario georreferenciado utilizaremos la llamada fórmula de Haversine, puesto que nos permitirá encontrar la distancia a través de dos puntos de la superficie de la tierra sirviéndonos de las coordenadas geográficas de latitud y longitud.

$$haversine\left(\frac{d}{r}\right) = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \dots \quad (1)$$

$$\dots + \cos(\phi_i) \cdot \cos(\phi_j) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

$$dist(i; j) = 2r \sin^{-1}(\sqrt{d}) \quad (2)$$

Donde:

$d$ , denota la distancia esférica (distancia entre  $i \rightarrow j$ ;  $\forall i, j$ )

$\phi$  denota a la latitud

$\lambda$  expresa la longitud

$\Delta\phi$ , diferencia de latitudes ( $\phi_j - \phi_i$ ).

$\Delta\lambda$ , diferencia de longitudes ( $\lambda_j - \lambda_i$ ).

$r$ , corresponde al radio de la esfera terrestre.

De entrada, tendremos como variables el número de usuarios  $N$ , donde se encuentran alojados todas las viviendas, el número de sitios candidatos para transformadores  $M$ , el conjunto de coordenadas latitud, longitud de viviendas y de transformadores del escenario. De hecho, se ha planteado también un conjunto de decisiones, esto con el firme propósito de ayudar a decidir donde, ubicar, colocar o desplegar transformadores de manera óptima y decidir a qué transformador de

distribución se conecta cada usuario o vivienda.

Considerando un grafo completo  $G = (V, E)$  donde  $V$  es el conjunto de todos los usuarios (nodos) y  $E$  es el conjunto de todas las posibles conexiones (bordes). Consideramos el MST (red de distribución soterrada), donde como hipótesis la red es dirigida con  $n$  nodos y que al menos se dispone de un nodo origen y un nodo destino.

Con lo anteriormente explicado se denota que el problema de planeación óptima de la red de electrificación soterrada para distribución es la siguiente:

Función objetivo:

$$\min_{x_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot x_{ij} \quad (3)$$

$$\min \sum_{(i,j) \in U} C_{ij} \cdot d_{ij} \quad (4)$$

Donde:

$x_{ij} \geq 0$ , es el trayecto recorrido a través de los nodos  $i \rightarrow j$ ;  $\forall i, j$

$C_{ij}$ , es el coste unitario concerniente al trayecto  $i \rightarrow j$

$d_{ij}$ , denota que a cada arco se le asocia un coste unitario a través de la red soterrada desde  $i \rightarrow j$ , con un coste mínimo total.

Sujeto a:

$$\sum_{i \in U} \alpha_{i,j}^{usu} = X_j^{trafo} \quad \forall j \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n U \leq Cap \quad \forall i \in U \quad (6)$$

$$\sum_{j \in S} X_j^{trafo} \leq Cap, \quad \forall i \in U \quad (7)$$

$$\sum_{i \in U} \alpha_{i,j}^{usu} = u \quad \forall i \in U \quad (8)$$

$$dist_B \leq dmin \quad (9)$$

La ecuación (5) denota que cada vivienda se conecta únicamente a el transformador óptimo más cercano, la ecuación (6) compromete a las viviendas conectadas a un sitio candidato para transformador óptimo no pueda exceder la capacidad de usuarios simultáneos por transformador, la restricción (7) limita la capacidad de usuarios simultáneos por transformador, la restricción (8) garantiza que cada usuario será cubierto y finalmente en la restricción (9) cumplimos con la condición de que los enlaces para el árbol de mínimo costo para transformadores son determinados por una distancia mínima.

Las variables empleadas en el modelo de planeación óptima para el despliegue de redes de electrificación soterrada para distribución basado en un proceso heurístico se pueden denotar en la tabla 1.

**Tabla 1.** Notaciones

$x_s, y_s$	Vectores de coordenadas x e y de nodos (viviendas)
$N$	Número de usuarios
$U$	Conjunto de usuarios (viviendas)
$\alpha_{i,j}^{usu}$	Coordenadas de cada vivienda
$x_{eb}, y_{eb}$	Vectores de coordenadas x e y de Transformadores de distribución
$S$	Conjunto de sitios candidatos para transformadores
$M$	Número de sitios candidatos para Transformadores
$coordT$	Coordenadas de transformadores óptimos
$Tr$	Conjunto de transformadores óptimos
$X_j^{trafo}$	Transformador óptimo más cercano
$dist_B$	Distancia euclidiana
$dmin$	Distancia mínima de la red
$usados$	Número de nodos (viviendas) utilizados
$G$	Matriz de conectividad
$usC$	Conjunto de usuarios conectados
$XX, YY$	Conjunto de vector de coordenadas longitud, latitud N y M

$dist(i; j)$	Distancia de Haversine
$V$	Vértices del conjunto de sitios candidatos
$u$	Usuario cubierto
$dist_{V_i} - usC_{j,k}$	Distancia entre el $V_i$ y el usuario i cercano
$du_i - s_j$	Distancia desde cada usuario a cada sitio candidato para transformador
$Cap$	Capacidad de usuarios simultáneos por transformador

A continuación, se detalla el Pseudocódigo que permite realizar el óptimo despliegue de transformadores con capacidad de N usuarios conectados simultáneamente.

---

**Algoritmo 1:** Árbol de Expansión Mínimo con Transformadores basado en Algoritmo Dijkstra

---

Grafo Georreferenciado (OSM) – openstreetmap

**Paso 1: Entrada:**

$dmin, usC$

**Paso 2: Salida:**

$Tr = \{Tr_1, \dots, Tr_k\}$

$coordT = \{(T_{x_1}, T_{y_1}), \dots, (T_{x_k}, T_{y_k})\}$

**Paso 3: Inicializar:**

**Para todo:**  $i \in U$  y  $j \in S$

**Si:**  $dist_B < dmin$

**Haga:**  $S = 1$

**Caso contrario:**  $S = 0$

**Paso 4: Para todo:**  $i \in U$  y  $j \in S$

**Si:**  $N \text{ en } j \leq Cap$  y  $S = 1$

**Haga:**  $U_i \in S_j$

**Paso 5: Encontrar:**

$coordT = \{(T_{x_1}, T_{y_1}), \dots, (T_{x_k}, T_{y_k})\}$

**Paso 6: Salida:**

$Tr = \{Tr_1, \dots, Tr_k\}$

$coordT = \{(T_{x_1}, T_{y_1}), \dots, (T_{x_k}, T_{y_k})\}$

**Paso 7: Terminar**

---

La respuesta ha, obtener dependerá del escenario propuesto y de la capacidad de usuarios simultáneos conectados a los transformadores.

La segunda fase es la conectividad entre transformadores, esto supone la existencia de  $V$  conjunto de nodos, como  $E$  enlaces existentes entre vértices, existiendo un grafo  $G(V, E, X_{i,j})$  que simboliza la topología de la Red de electrificación Soterrada.

A continuación, se detalla el Pseudocódigo de la heurística para el

## Modelo de Despliegue Óptimo de Redes de Distribución Soterradas.

### Algoritmo 2: DORDS Despliegue Óptimo de Redes de Distribución Soterrada

Grafo Georreferenciado (OSM) – openstreetmap

**Paso 1: Entrada:**  
 $x_s = \{x_{s1}, \dots, x_{sn}\}; y_s = \{y_{s1}, \dots, y_{sn}\}$   
 $x_{eb} = \{x_{eb1}, \dots, x_{ebn}\}; Cap$   
 $y_{eb} = \{y_{eb1}, \dots, y_{ebn}\}$

**Paso 2: Salida:**  
 $Tr = \{Tr_1, \dots, Tr_k\}$   
 $coordT = \{(T_{x_1}, T_{y_1}), \dots, (T_{x_k}, T_{y_k})\};$

**Paso 3: Inicializar:**  
 $N = \|U\|; M = \|S\|; flag = 0;$   
 $usc = 0; cont = 0;$

**Paso 4:** Obtener:  $XX = [x_s; x_{eb}];$   
 $YY = [y_s; y_{eb}];$

**Paso 5:** Set Preasignación de ruta  
 Obtener distancia ecuación (2)  
 $du_i - s_j = dist(i, j);$   
 $\forall i = 1 \rightarrow N; \forall j = 1 \rightarrow M$

**Paso 7:** Set Algoritmo Dijkstra  
 Dijkstra  $\rightarrow$  despliegue de la Red soterrada  $N \leftrightarrow M$   
 $u_j = d_{1i}, j = 2, \dots, n$   
 $Tr = \{2, \dots, n\}, pred(i) = 1,$   
 $i = 2, \dots, n$

**Paso 8:** **while** ( $flag == 0$ ):  
**for**  $\forall i = 1 \rightarrow NN$   
**for**  $\forall j = 1 \rightarrow K$   
 $dist_{V_i} - usc_{j,k} = dist_B$   
**endfor**  
**endfor**  
 $G = dist_B$   
 $dist_B \leq dmin$   
 $flag = 1;$   
**endwhile**  
 $G(i, j) = 0; \rightarrow \forall i = 1 \rightarrow NN,$   
 $\forall j = i + 1 \rightarrow K$

**Paso 9:** **set**  $coordT$  como coordenadas de  $Tr$

**Paso 10** Retornar  
 $Tr = \{Tr_1, \dots, Tr_k\}$   
 $coordT = \{(T_{x_1}, T_{y_1}), \dots, (T_{x_k}, T_{y_k})\};$

## 4. Análisis de resultados

El presente trabajo considera adicional a lo presentado por [5], [6], la cantidad de usuarios conectados simultáneamente a un transformador ; es decir, considera los recursos. Nuestro modelo de planeación es capaz de generar un algoritmo que cumple con los requisitos de una red de

electrificación soterrada para distribución óptima. La utilidad de nuestro modelo de planeación se evalúa en términos de eficiencia cuando se varía la densidad poblacional de los escenarios, es decir el modelo se ajusta al uso de recursos requeridos para diferentes números poblacionales.

Para ejemplarizar la utilidad de este modelo de planeación óptima, se ha dispuesto proyectar un escenario georreferenciado, donde encontraremos un conjunto de usuarios que se irán desplegando en la red de electrificación soterrada propuesta de manera escalable sobre el escenario ya anteriormente descrito.

Se presentan resultados de análisis en términos de perfiles de tensión, huecos de tensión y cortocircuito, situación innovadora para este tipo de cálculo. En la Tabla 2. se aprecia los parámetros iniciales aplicados para valorar y exhibir los resultados.

Tabla 2. Parámetros iniciales

Descripción	Variables	Condición inicial
Capacidad	Capacidad	5
Cobertura	Cobertura	1
Escenario	Número (#)	1
Mapa	Longitud, Latitud	Coordenadas x e y
Población	# de usuarios	32

En la fig. 6, se logra apreciar la matriz  $D$  de distancias euclidianas para muestras de usuarios de 32, 64, 128, 256 y 512, los cálculos se realizaron bajo la ecuación (1) denotada anteriormente, dependiendo de longitud obtenida en cálculos se mostrará en escala policromática el paso gradual de dichas longitudes, siendo azul las de menor distancia y amarillo las de mayor.

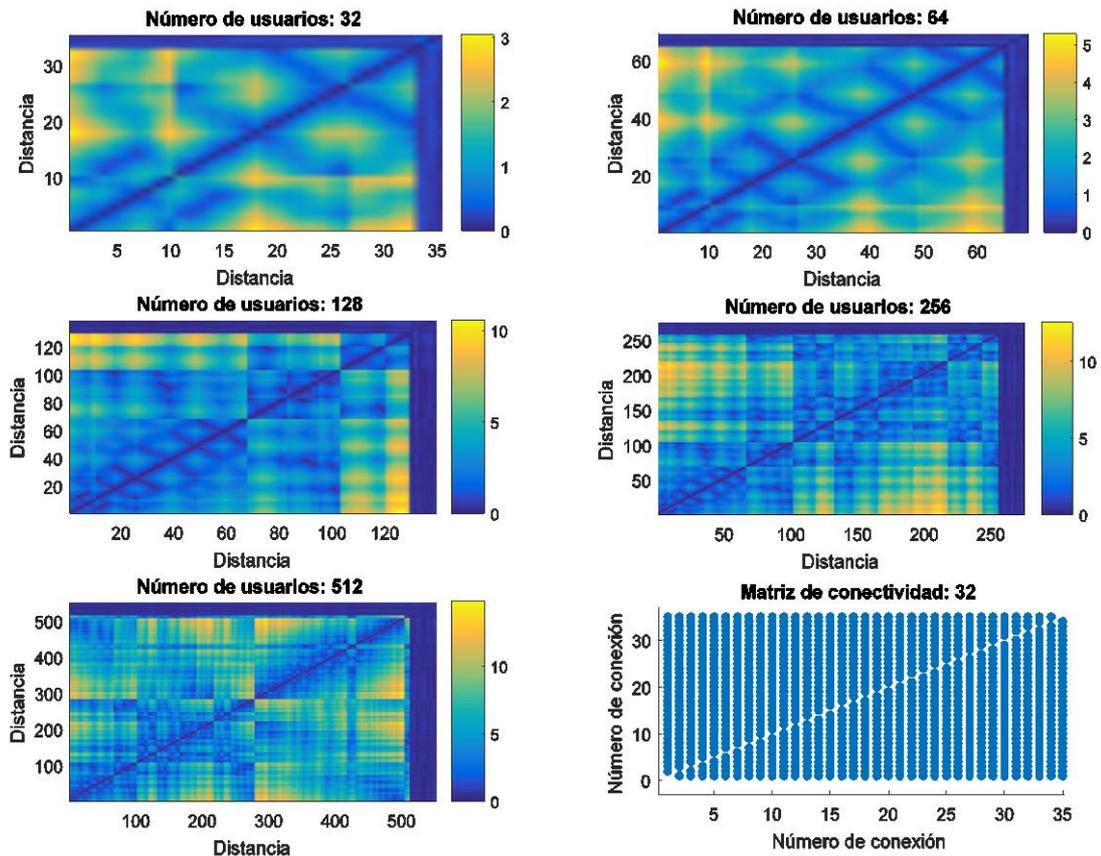


Figura 6. Matriz de distancias representada en escala policromática

Cabe apreciar que esta matriz permite establecer un escenario finito definido por  $n$  usuarios de una matriz simétrica de dimensión  $n \times n$ , donde se muestra diferentes distancias entre usuario y usuario, también cabe resaltar que las distancias de la diagonal son ceros, es decir estos valores denotan que no existirá distancia alguna respecto a sí mismos además el resto de las distancias de la matriz  $D$  euclidiana son distancias más pequeñas cuanto más cerca se encuentren los usuarios. La zona pintada de azul denota que los transformadores de la matriz  $m \times m$  no se conectaron de allí la expresión gráfica.

El planeamiento óptimo de redes de distribución se encamina en el estudio de matrices  $D$  de distancias euclidianas, puesto que este tipo de análisis aplica teoría de gráficos con el principal propósito minimizar el despliegue real de las redes.

En la fig.7 se presenta el resultado del modelo de planeación para el

despliegue óptimo de la red de electrificación soterrada para distribución. El escenario muestra una densidad de 64 usuarios para una capacidad de 5 usuarios simultáneos, se aprecia también los transformadores óptimos y sus respectivas coordenadas cartesianas tanto en escenario escogido como en Cymdist.

Como podemos apreciar el modelo de planeación es un modelo de despliegue escalable para una red de electrificación soterrada para distribución que define la cantidad de recursos, agrupaciones y rutas entre usuarios y puntos de conexión (pozos, transformadores). Los resultados denotan que los recursos de la red soterrada optimizan el despliegue; es decir, que nuestro modelo de planeación óptima para el despliegue de redes de electrificación soterrada para distribución es capaz de involucrar diferentes densidades poblacionales y distribuciones geográficas.

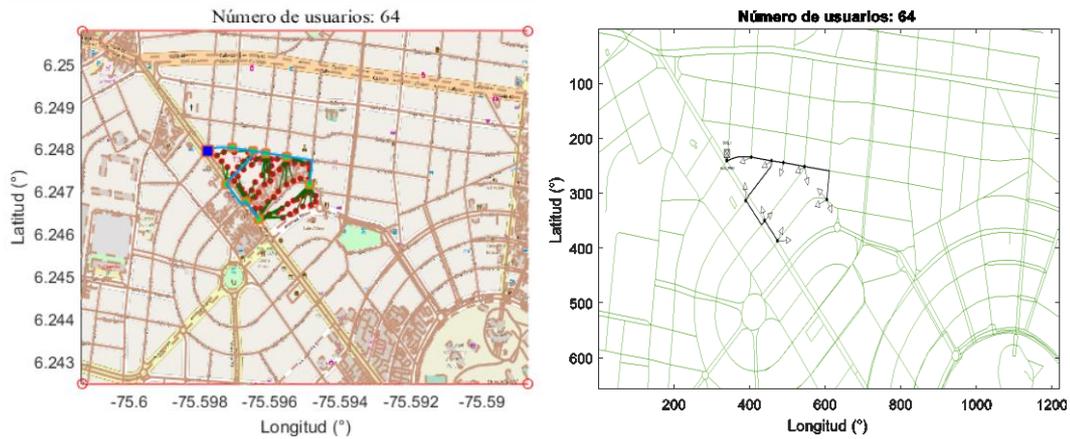


Figura 7. Escenarios con una densidad poblacional de 64.

La fig. 8 nos permite evidenciar el comportamiento con valores de capacidad de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 para el escenario propuesto, en todos los casos se dispone de una densidad poblacional de 32, 64, 128, 256 y 512 usuarios.

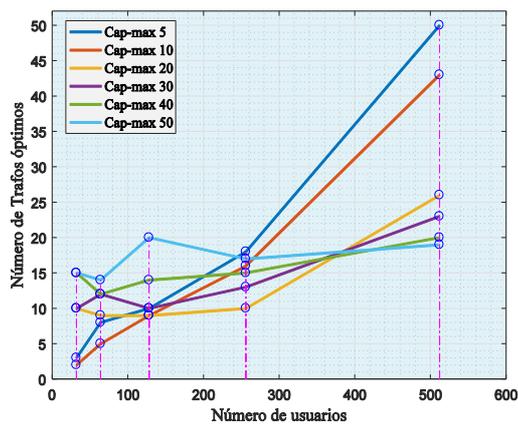


Figura 8. Relación Número de usuarios vs Número de transformadores óptimos

Los resultados del modelo de planeación óptima permiten diagnosticar rápidamente posibles opciones de despliegue de redes de electrificación soterrada de distribución. Así mismo el modelo heurístico advierte escalabilidad debido a que permite realizar variación de parámetros a diferentes escenarios y que finalmente entregar una óptima solución.

Hay una clara tendencia a que cuan mayor es la cantidad de usuarios, menor es la cantidad de transformadores óptimos, así que suponemos que con

redes mucho más grandes y un mayor número de usuarios se empequeñece a un más el número de transformadores óptimos.

La fig. 9 evidencia los enlaces de los usuarios a cada pozo de inspección, donde las métricas denotan escenarios que consideran capacidades de 5, 10, 20, 30, 40 y 50, con escenarios de densidad poblacional dispuestos para 32, 64, 128, 256 y 512 usuarios.

La fig. 9 nos permite evidenciar el comportamiento con 6 valores de capacidad para el escenario propuesto, en cada caso el número de usuarios indica el incremento del número de pozos de inspección a los que se conectan los mismos, así que el resultado del proceso de optimización en cuanto a que pozo de inspección se conecta un usuario de la red de electrificación soterrada propuesta considera que cada nodo de la red es un nodo factible en el cual existe un pozo.

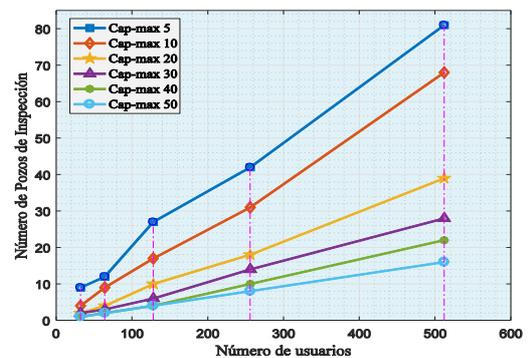


Figura 9. Relación Número de usuarios vs Número de pozos de inspección

En la fig. 10 se evidencia el tiempo que tarda una CPU en ejecutar el código del modelo de planeación óptimo para el despliegue de la red de electrificación soterrada propuesto, donde la métrica utilizada para determinar el tiempo que demora la CPU se denota por las distintas capacidades mostradas en la leyenda de la fig. 10 y ejecutado a las cantidades de usuarios  $N=32$ ,  $N=64$ ,  $N=128$ ,  $N=256$  y  $N=512$ .

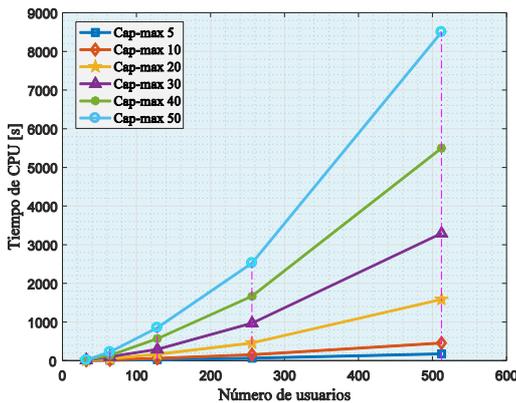


Figura 10. Comportamiento del Rendimiento de CPU

Podemos apreciar que el comportamiento en el tiempo total CPU en segundos utilizado por la heurística desde el instante en que se inicia el algoritmo de planeación óptima propuesto varía según se incrementa la capacidad y al número de nodos que se espera leer, así denotamos que el análisis en la línea de tiempo total CPU indica que mientras la cantidad de nodos no es considerable existirá un corto tiempo de CPU, pero conforme se incrementa el número de nodos la línea de tiempo se incrementa considerablemente.

La fig. 11 nos permite evidenciar no solo el perfil de tensión de la red optimizada según la distancia en metros, sino que también se aprecia la disconformidad entre fases, dicha gráfica proporciona información relevante aguas abajo, ya que el resultado permite decidir sobre cual fase se deben conectar las futuras cargas para conservar el desbalance mínimo de entre fase y fase.

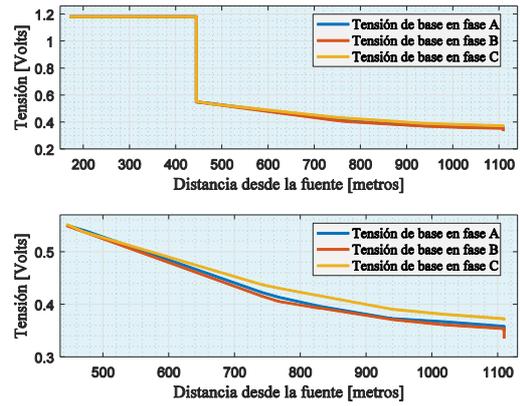


Figura 11. Escenario Perfil de Tensión

La fig. 11 presenta el resultado de la optimización utilizando el software Cymdist donde se denota que la caída de tensión depende de la distancia y la impedancia hasta en nodo de estudio, si el punto o nodo de estudio se encuentra alejado de la fuente la impedancia entre estos dos elementos es grande lo que implica una relación directa.

En la fig. 12 se presentan los resultados obtenidos bajo en software Cymdist y donde se denota la magnitud o tensión residual del hueco en p.u de tensión y la línea del tiempo en ms (milisegundos) durante el cual cae la tensión. Se visualiza que los huecos de tensión se sitúan en diferentes zonas, es decir, que la severidad de los huecos influye en la impedancia y localización de las fallas, la conexión de transformadores, el modo de actuar de las protecciones, la conexión de c/carga y si los cortocircuitos son LLL, LL, LLT o LT.

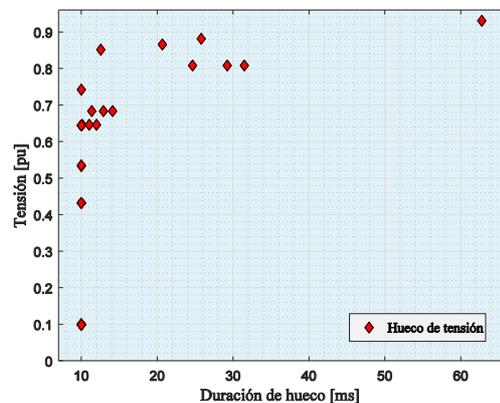
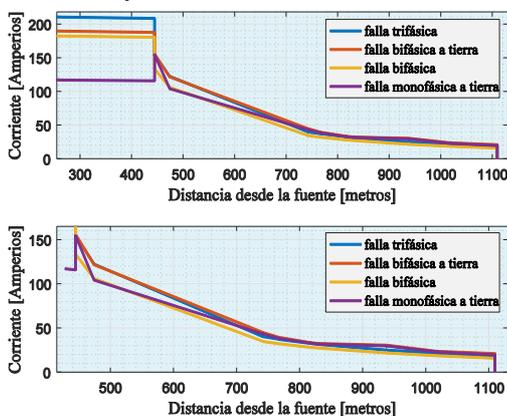


Figura 12. Escenario Hueco de Tensión definido por sus características.

La fig. 12 también denota que existe una zona muy poblada de huecos de tensión, es decir que en el periodo comprendido entre 10 y 30 (ms) ocurren gran parte de las anomalías y que el hueco que apreciamos alejado denota la presencia de un solo hueco, es decir que en ese periodo de tiempo existirá un solo evento inmune a los impactos de los huecos, por lo tanto, muestra tolerable los eventos que relacionan la duración del hueco con su tensión y permite seguir en operación la red. Al contrario, de los huecos que se encuentren por debajo de 0.6 p. u de tensión, pues estos pueden provocar la interrupción o el incorrecto funcionamiento de la carga.

En la fig. 13 podemos apreciar el comportamiento existente entre corriente en amperios y distancia fuente falló en metros, donde podemos visualizar que hasta cierta distancia la corriente se mantiene uniforme, pero al momento de fallo está tiene un evento brusco como se puede evidenciar, así que advertimos por colores la conducta de los fallos LLL, LL, LLT y LT.



**Figura 13.** Comportamiento Corriente de Cortocircuito

De hecho, en la fig. 13 observamos el vínculo existente entre las magnitudes de corriente de cortocircuito y la resistencia implícita entre en nodo fuente y la zona de falla, que igualmente obedece a la distancia del cable eléctrico subterráneo hasta el nodo cortocircuitado, es decir, los resultados obtenidos en simulación denotan mayor presencia de fallo en

cortocircuitos monofásicos a tierra mientras que en medida menor los LL, LLT y los LLL siendo que después del fallo la corriente va disminuyendo hasta topar tierra.

## 5. Conclusiones

El modelo heurístico planteado, permite planear el despliegue de una red de electrificación soterrada para distribución de manera óptima, minimizando los costos por uso de recursos requeridos para un enrutamiento de mínimo costo sobre un escenario georreferenciado. El MST permite que las empresas de distribución eléctrica planifiquen y determinen la escalabilidad de la red soterrada según se incrementa el número de usuarios que se desea cubrir para brindar un sistema de red de electrificación soterrada para todos los abonados. El modelo de planeación óptima basados en un proceso heurístico tiene características de respuesta finita determinado por el lapso tiempo conseguido en la exploración, y es lineal para el árbol de enrutamiento.

El modelo de planeación óptimo para electrificación de redes soterradas para distribución basado en un proceso heurístico es escalable puesto que permite ir variando parámetros para diferentes escenarios posibles y entrega una óptima solución.

El trabajo de investigación explora la ventaja del principio de optimalidad y establece con éxito un vínculo con la planeación de redes de distribución soterradas y hace que la heurística sea computacionalmente eficaz.

El planeamiento de redes de electrificación efectuados por las compañías de distribución se realiza tradicionalmente, basándose en la experticia de los ingenieros a cargo de ese departamento. El modelo de planeación óptimo propuesto en este trabajo tiene gran desempeño cuando se sirve a redes de distribución soterradas.

Adicionalmente el modelo de red optimizado incluye todos los elementos de una red de electrificación soterrada real, el cuál al ser solventado con una metodología eficiente, permite obtener soluciones de muy alta jerarquía al respecto de los costes por recurso empleado y los requerimientos técnicos de la red.

Los resultados del modelo permiten diagnosticar rápidamente posibles opciones de despliegue y enrutamiento de redes de electrificación soterradas para distribución contemplando la cantidad de usuarios conectados simultáneamente a un transformador. Por lo tanto, el modelo advierte minimizar los tiempos de diseño y planeación para el despliegue de las redes de electrificación soterradas representadas en un escenario georreferenciado así que la propuesta brinda un mapa de ruta con visión para la planificación óptima de redes eléctricas soterradas.

Finalmente, el modelo de planeación óptima propuesto puede ser empleada para solventar el despliegue de redes de distribución soterradas, con la ventaja de obtener soluciones con excelentes condiciones operativas sin que importe el escenario propuesto.

## 6. Referencias

- [1] J. Inga, E. Inga, R. Hincapié, and G. Cristina, "Optimal Planning for Deployment of FiWi Networks based on Hybrid Heuristic Process," *IEEE Lat. Am. Trans.*, 2017.
- [2] Y. Xiang *et al.*, "Optimal Active Distribution Network Planning: A Review," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 44, no. 10, pp. 1075–1094, 2016.
- [3] V. C. Cunha and J. R. S. Mantovani, "Planning and Project of Medium Voltage Electric Power Distribution Systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2298–2308, 2016.
- [4] R. C. Lotero and J. Contreras, "Distribution system planning with reliability," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2552–2562, 2011.
- [5] S. Chouhan, F. D. Mohammadi, A. Feliachi, J. M. Solanki, and M. A. Choudhry, "Hybrid MAS Fault Location, Isolation, and Restoration for smart distribution system with Microgrids," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2016–Novem, pp. 1–5, 2016.
- [6] J. Wong, P. Baroutis, R. Chadha, R. Iravani, M. Graovac, and X. Wang, "A methodology for evaluation of permissible depth of penetration of distributed generation in urban distribution systems," *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–8, 2008.
- [7] S. G. Benetti de Padua, J. R. Sanches Mantovani, and A. M. Cossi, "Planning Medium-Voltage Electric Power Distribution Systems through a Scatter Search Algorithm," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2637–2645, 2015.
- [8] A. Navarro and H. Rudnick, "Large-scale distribution planning - Part II: Macro-optimization with voronoi's diagram and tabu search," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 752–758, 2009.
- [9] J. Liu, H. Guo, H. Nishiyama, H. Ujikawa, K. Suzuki, and N. Kato, "New Perspectives on Future Smart FiWi Networks: Scalability, Reliability, and Energy Efficiency," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1045–1072, 2016.
- [10] A. Peralta Sevilla, E. Inga

- Ortega, and R. Hincapie, "FiWi network planning for smart metering based on multistage stochastic programming," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3838–3843, 2015.
- [11] M. R. Elkadeem, M. A. Alaam, and A. M. Azmy, "Improving performance of underground MV distribution networks using distribution automation system: A case study," *Ain Shams Eng. J.*, 2015.
- [12] S. F. Abdelsamad, W. G. Morsi, and T. S. Sidhu, "Optimal secondary distribution system design considering plug-in electric vehicles," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 266–276, 2016.
- [13] Z. hua Zhang, B. yin Xu, P. Crossley, and L. Li, "Positive-sequence-fault-component-based blocking pilot protection for closed-loop distribution network with underground cable," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 94, pp. 57–66, 2018.
- [14] A. H. A. Bakar, M. S. Ali, C. Tan, H. Mokhlis, H. Arof, and H. A. Illias, "High impedance fault location in 11kV underground distribution systems using wavelet transforms," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 723–730, 2014.
- [15] H. Ahmadi and J. R. Martí, "Distribution system optimization based on a linear power-flow formulation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 1, pp. 25–33, 2015.
- [16] J. Salehi and M.-R. Haghifam, "Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 321–333, 2012.
- [17] S. Ganguly, N. C. Sahoo, and D. Das, "Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 46, pp. 65–78, 2013.
- [18] N. C. Sahoo, S. Ganguly, and D. Das, "Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 3, pp. 15–32, 2012.
- [19] E. Inga, R. Hincapié, C. Suárez, and G. Arévalo, "Shortest Path for Optimal Routing on Advanced Metering Infrastructure using Cellular Networks," *2015 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2015 - Conf. Proc.*, 2015.
- [20] A. Peralta-Sevilla, E. Inga, R. Cumbal, and R. Hincapié, "Optimum deployment of FiWi Networks using wireless sensors based on Universal Data Aggregation Points," *2015 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2015 - Conf. Proc.*, 2015.
- [21] J. Zhou, L. Chen, K. Wang, and F. Yang, "Fuzzy  $\alpha$ -minimum spanning tree problem: Definition and solutions," *Int. J. Gen. Syst.*, vol. 45, no. 3, pp. 311–335, 2016.
- [22] A. Pathania, V. Venkatramani, M. Shafique, T. Mitra, and J. Henkel, "Optimal Greedy Algorithm for Many-Core Scheduling," *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 36, no. 6, pp. 1054–1058, 2017.
- [23] 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.
- [24] S. Singh, T. Ghose, and S. K. Goswami, “Optimal feeder routing based on the bacterial foraging technique,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 70–78, 2012.
- [25] D. S. Yershov and S. M. Lavalley, “Simplicial dijkstra and A \* algorithms: From graphs to continuous spaces,” *Adv. Robot.*, vol. 26, no. 17, pp. 2065–2085, 2012.
- [26] C. H. Liu, C. X. Lin, I. C. Chen, D. T. Lee, and T. C. Wang, “Efficient multilayer obstacle-avoiding rectilinear steiner tree construction based on geometric reduction,” *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 33, no. 12, pp. 1928–1941, 2014.
- [27] G. Liu, X. Huang, W. Guo, Y. Niu, and G. Chen, “Multilayer obstacle-avoiding X-architecture steiner minimal tree construction based on particle swarm optimization,” *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 45, no. 5, pp. 989–1002, 2015.
- [28] C. Rodrigues Costa, V. Rosset, and M. Cristina Vasconcelos Nascimento, “A GRASP for the steiner tree problem in graphs to support multicast routing,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3873–3878, 2015.
- [29] M. Khan, G. Pandurangan, and V. S. A. Kumar, “Distributed Algorithms for Constructing Approximate Minimum Spanning Trees in Wireless Sensor Networks,” *Parallel Distrib. Syst. IEEE Trans.*, vol. 20, no. 1, pp. 124–139, 2009.
- [30] E. Inga, S. Céspedes, R. Hincapié, and C. A. Cárdenas, “Scalable Route Map for Advanced Metering Infrastructure Based on Optimal Routing of Wireless Heterogeneous Networks,” *IEEE Wirel. Commun.*, no. April, pp. 2–9, 2017.
- [31] R. R. Puente and M. L. Cortes, “Graph-reduction algorithm for finding shortest path in Geographic Information Systems,” *Ieee Lat. Am. Trans.*, vol. 10, no. 6, pp. 2201–2208, 2012.
- [32] J. Nahman and D. Perić, “Path-set based optimal planning of new urban distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 85, pp. 42–49, 2017.
- [33] R. H. Fletcher and K. Strunz, “Optimal Distribution System Horizon Planning-Part I: Formulation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 791–799, 2007.
- [34] R. H. Fletcher and K. Strunz, “Optimal Distribution System Horizon Planning-Part II: Application,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 862–870, 2007.
- [35] 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.
- [36] D. Kumar and S. R. Samantaray, “Design of an advanced electric power distribution systems using seeker optimization algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 196–217, 2014.
- [37] T. V. Garcez and A. T. de Almeida, “Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity



- Residential Demand Response in Distribution Networks,” *Ieee J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. July, pp. 1–10, 2014.
- [52] M. Y. Nguyen and D. M. Nguyen, “A new framework of demand response for household customers based on advanced metering infrastructure under smart grids,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 44, no. 2, pp. 165–171, 2016.
- [53] S. J. Olivieri, G. P. Henze, C. D. Corbin, and M. J. Brandemuehl, “Evaluation of commercial building demand response potential using optimal short-term curtailment of heating, ventilation, and air-conditioning loads,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, no. 2, pp. 100–118, 2014.
- [54] M. Yosef, M. M. Sayed, and H. K. M. Youssef, “Allocation and sizing of distribution transformers and feeders for optimal planning of MV/LV distribution networks using optimal integrated biogeography based optimization method,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 128, pp. 100–112, 2015.
- [55] T. Kong, H. Cheng, Z. Hu, and L. Yao, “Multiobjective planning of open-loop MV distribution networks using ComGIS network analysis and MOGA,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 390–398, 2009.
- [56] A. N. Souza, P. Da Costa, P. S. Da Silva, C. C. O. Ramos, and J. P. Papa, “Efficient fault location in underground distribution systems through optimum-path forest,” *Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 5, pp. 503–515, 2012.
- [57] 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.
- [58] J. Li, X. Y. Ma, C. C. Liu, and K. P. Schneider, “Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 3021–3029, 2014.
- [59] S. Xie and Y. Wang, “Construction of tree network with limited delivery latency in homogeneous wireless sensor networks,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 78, no. 1, pp. 231–246, 2014.
- [60] T. W. Kuo, K. C. J. Lin, and M. J. Tsai, “On the construction of data aggregation tree with minimum energy cost in wireless sensor networks: NP-completeness and approximation algorithms,” *IEEE Trans. Comput.*, vol. 65, no. 10, pp. 3109–3121, 2016.
- [61] J. W. Leigh and D. Bryant, “POPART: Full-feature software for haplotype network construction,” *Methods Ecol. Evol.*, vol. 6, no. 9, pp. 1110–1116, 2015.
- [62] J. Lodder, “Networks and Spanning Trees: The Juxtaposition of Prüfer and Borůvka,” *Primus*, vol. 24, no. 8, pp. 737–752, 2014.
- [63] R. Xie and X. Jia, “Transmission Efficient Clustering Method for Wireless Sensor Networks using Compressive Sensing,” *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, pp. 1–11, 2013.
- [64] D. Sarkar, A. De, C. K. Chanda, and S. Goswami, “Kruskal’s Maximal Spanning Tree Algorithm for Optimizing Distribution Network Topology

- to Improve Voltage Stability,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 43, no. 17, pp. 1921–1930, 2015.
- [65] O. V. Gnana Swathika and S. Hemamalini, “Prims-Aided Dijkstra Algorithm for Adaptive Protection in Microgrids,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 1279–1286, 2016.
- [66] D. P. Montoya and J. M. Ramirez, “A minimal spanning tree algorithm for distribution networks configuration,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–7, 2012.
- [67] P. Tewarie, E. van Dellen, A. Hillebrand, and C. J. Stam, “The minimum spanning tree: An unbiased method for brain network analysis,” *Neuroimage*, vol. 104, pp. 177–188, 2015.
- [68] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. González, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *iee l*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [69] A. R. Alves, “An Algorithm for the Minimum Spanning Tree Problem with Uncertain Structures,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 4–5, 2015.