

# Optimal Design of Electrical Distribution Networks Using Optimization Models

INGENIERIA ELECTRICA

## Diseño Óptimo de Redes Eléctricas de Distribución Mediante Modelos de Optimización

Luis Amaya Vásquez<sup>1§</sup>, Miguel Ángel Campaña Molina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidad Politécnica Salesiana, Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito,  
Ecuador*

Amaya-Vasquez L, Campaña-Molina MA. Diseño Óptimo de Redes Eléctricas de Distribución Mediante Modelos de Optimización. Ingeniería y competitividad, 2023,25(1); e-20311572 <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i1.11572>

§ [lamaya@est.ups.edu.ec](mailto:lamaya@est.ups.edu.ec), [mcampana@ups.edu.ec](mailto:mcampana@ups.edu.ec)

Recibido: 31 de agosto de 2021 – Aceptado: 9 de junio de 2022

### Abstract

This paper proposes an alternative methodology to optimally design an electrical distribution system in a real urban area. A medium voltage (MV) network polygon is extracted from the web page of a distribution company (GIS platform), which serves as a comparison pattern. A redesign of the medium voltage network is made to the extracted polygon. Taking as a premise that it is a new urbanization that needs to be provided with electric power, with all the technical requirements imposed by the regulating entity, good power quality and at minimum cost. To achieve this goal, two mathematical optimization models are used. The methodology begins by delimiting the project area in a geo-referenced manner; in this area 36 possible sites are located where the distribution transformers that will provide electricity to the new urbanization can be placed. The first optimization model determines how many transformers will be installed, by means of a minimization objective function, the constraints of the model are: transformer capacity (KVA) and coverage (number of subscribers connected to the low voltage network of each transformer). Once the number of transformers to be installed and their respective geo-referenced optimal locations are determined, the model is run. The second heuristic optimization model, based on graph theory, calculates the minimum spanning tree for the connection of the medium voltage electrical network, thus interconnecting the transformers of the project with the minimum distance, thus optimizing the construction cost. These optimization models are implemented and solved with Matlab and LpSolve software. The topology found with the two proposed models is electrically evaluated by running power flows with CYMEDIST software. Finally, the proposed model is evaluated by comparing the electrical parameters obtained with the electrical parameters of the polygon extracted from the GIS system of the distribution company.

**Keywords:** *Distribution Networks, Georeferencing, Optimization, Planning, Power Quality.*

## Resumen.

El presente trabajo propone una metodología alternativa para diseñar de manera óptima un sistema eléctrico de distribución sobre un área urbana real. De la página web de una empresa distribuidora (plataforma GIS), se extrae un polígono de red de medio voltaje (MT) el cual sirve como patrón de comparación. Al polígono extraído se le realiza un re-diseño de la red de media tensión. Tomando como premisa que es una nueva urbanización que requiere ser dotada de energía eléctrica, con todas las exigencias técnicas que impone el ente regulador, buena calidad de energía y al mínimo costo. Para lograr este cometido se usan dos modelos matemáticos de optimización. La metodología inicia delimitando el área del proyecto de forma georreferenciada, en esta área se ubican 36 posibles sitios en los cuales se puede instalar los transformadores de distribución que dotarán de energía eléctrica a la nueva urbanización. El primer modelo de optimización determina el número de transformadores a instalar mediante una función objetivo de minimización, las restricciones del modelo son: capacidad de los transformadores (KVA) y la cobertura (número de abonados conectados a la red de baja tensión de cada transformador). Una vez determinado el número de transformadores a instalar y su respectiva ubicación óptima georreferenciada, se corre el segundo modelo de optimización de tipo heurístico, basado en la teoría de grafos, se calcula el árbol de mínima expansión para la conexión de la red eléctrica de media tensión, de esta forma se interconecta los transformadores del proyecto con la mínima distancia, por ende, se optimiza el costo de construcción. Estos modelos de optimización son implementados y resueltos con los softwares Matlab y LpSolve. La topología encontrada con los dos modelos propuestos es evaluada eléctricamente mediante la corrida de flujos de potencia con el software CYMEDIST. Finalmente se evalúa la metodología de diseño propuesta, comparando los parámetros eléctricos obtenidos con los modelos de optimización versus los parámetros eléctricos que cuenta el polígono extraído del sistema GIS de la empresa distribuidora.

**Palabras Clave:** Calidad de energía, Georreferenciación, Optimización, Planeación, Redes de Distribución.

## 1. Introducción

El crecimiento económico del mundo actual se encuentra estrechamente relacionado con el crecimiento de consumo energético, esto implica que exista un mayor número de usuarios que requieren conectarse a la red eléctrica, lo que exige una mayor carga instalada (1). Por lo tanto, es de suma importancia contar con una adecuada planificación que le permita al sistema eléctrico operar correctamente ante una eventual expansión, cumpliendo con el objetivo de entregar energía con los estándares de calidad al menor costo (2).

La planificación y futura expansión de la red eléctrica son temas de interés de las empresas distribuidoras de energía, considerando que estas también juegan su papel fundamental debido a la relación directa que mantienen con los usuarios finales (3,4). La planificación de redes eléctricas se enfrenta a nuevos y cada vez

más complejos desafíos debido al comportamiento dinámico de la demanda; así como también, a la introducción de cargas desbalanceadas y variaciones en la dirección de los flujos de potencia dados por la instalación de generación distribuida junto a la carga (1,5,6). En consecuencia, la planificación y selección adecuada de la topología de la red eléctrica es vital para un excelente desempeño del sistema a la vez que los usuarios puedan disfrutar de un eficiente suministro eléctrico (7).

Una red de distribución que ha sido diseñada con una óptima topología proveerá un servicio adecuado de energía y es capaz de soportar incrementos de potencia y demanda. Por lo tanto, las caídas de voltaje en el sistema están dentro de las exigencias establecidas por los entes de regulación de las empresas distribuidoras de energía local (8).

La metodología de diseño actual de redes de distribución eléctrica ubica los centros de carga en función de la experiencia del diseñador, entrega solo resultados de caída de tensión, limitándose a otros parámetros eléctricos de la red, tales como: desbalance de carga, pérdidas técnicas de potencia, flujos de potencia, cargabilidad de los conductores y no considera parámetros o cuantificadores económicos. Siendo todos estos parámetros de importancia para el planeamiento, diseño y operación de cualquier sistema eléctrico de distribución (8–15).

Es por tal motivo que el presente trabajo propone una metodología alternativa para el diseño de redes de distribución eléctrica, basándose en métodos de optimización. Plantea la función objetivo como una minimización de recursos que impactan en la reducción de costos de construcción de la red, en función de las restricciones de carácter técnico. De esta manera, se logra integrar el área técnica y el área económica de una red de distribución eléctrica. (16–23).

De aquí en adelante, el presente trabajo se organiza de la siguiente manera: En la sección II se formula el problema, en la sección III analizan los resultados y en la sección IV se exponen las conclusiones.

## 2. Formulación del Problema

Para realizar el diseño de una red de distribución eléctrica de medio voltaje, se tiene como principales variables: el número de usuarios a ser dotados de energía eléctrica (N), el número de transformadores a instalar, la capacidad (C) en potencia aparente (KVA) de cada transformador a instalar, la longitud de la red eléctrica de medio voltaje o también llamado alimentador primario a ser construido y los parámetros eléctricos que garantizan la calidad del producto eléctrico a entregar a cada cliente.

La metodología clásica de diseño se centra en cumplir con los parámetros técnicos y no considera los parámetros económicos. Este artículo propone una metodología de diseño eléctrico de redes de distribución de medio voltaje que: a más de garantizar los parámetros técnicos también garantiza un mínimo costo de inversión, a continuación se detalla la metodología propuesta.

Se extrae un polígono de red de medio voltaje (MT) de la página web de una empresa distribuidora (plataforma GIS), la cual sirve como patrón de comparación. La Figura 1 muestra el polígono extraído y cómo está actualmente construida la red de MT en el sector. Dicha red fue diseñada y construida de acuerdo con la normativa de la empresa distribuidora de energía; es decir por métodos tradicionales.

Para el desarrollo del presente artículo se asume la premisa que el polígono extraído del sistema GIS de la empresa distribuidora no cuenta con energía eléctrica, por lo tanto se considera una nueva urbanización tipo residencial, estratificada sectorialmente por la empresa distribuidora como usuarios tipo B, la cual cuenta con 200 lotes de terreno que requieren ser dotados de energía eléctrica con una buena calidad de energía y la construcción de la red de MT sea al mínimo costo (24–31).

La metodología de diseño propuesta está conformada por 4 etapas:

- Etapa 1.- Inicia con la georeferenciación de la nueva urbanización, se obtiene las coordenadas del polígono de estudio y de los polígonos de los lotes, se ubica en función de las calles y lotes los posibles sitios candidatos para la ubicación de los transformadores.
- Etapa 2.- El primer modelo de optimización lineal entera, minimiza el número de transformadores, toma como restricciones la capacidad y cobertura, ejecuta la optimización y entrega como resultado el

número óptimo de transformadores a instalar en los sitios óptimos, entendiéndose como sitio óptimo el centro de carga.

- Etapa 3.- Una vez conocidos los sitios donde se ubicarán óptimamente los transformadores y cuantos usuarios se conectarán a cada



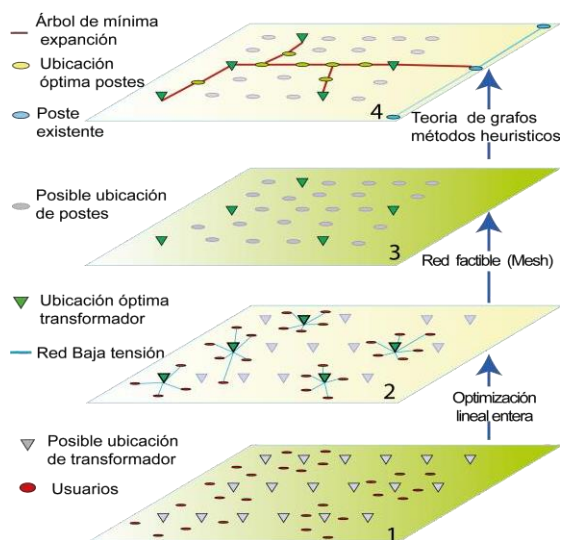
Figura 1. Polígono de estudio de red eléctrica de MT real. (Fuente, GIS Empresa Distribuidora).

- transformador (cobertura), se inserta en el polígono bajo estudio postes en todas las calles, de esta manera se forma una malla factible o (mesh factible). En si se crea las posibles rutas por donde se construirá la red eléctrica de medio voltaje, siendo el objetivo de la optimización determinara la ruta más corta.
- Etapa 4.- Una vez creada la malla factible, ubicados óptimamente los transformadores e identificado y georreferenciado el punto de arranque de la nueva red de media tensión, es necesario obtener la ruta más corta del alimentador primario. Esto es un problema

de enrutamiento, este problema es resuelto mediante el segundo modelo de optimización propuesto a través de la teoría de grafos con la ayuda de métodos heurísticos y árboles de mínima expansión para garantizar una topología radial que conecte todos los elementos al mínimo costo (9).

La importancia de conectar los elementos de la red al menor costo se traduce en menores pérdidas en el sistema y la optimización en la cantidad de conductor empleado para la implementación de la red. En consecuencia, la planificación de una red de distribución que considere su expansión y se base en criterios de optimización garantizará un sistema rentable para las empresas distribuidoras (22). Las 4 etapas de la metodología usada se ilustran en la Figura 2.

Por lo tanto la metodología de diseño eléctrico de distribución se basa en 2 algoritmos de optimización donde se plantean las funciones objetivo como una minimización, el primer algoritmo es de capacidad y cobertura y el segundo algoritmo de dimensionamiento óptimo de la topología de la red de medio voltaje, a continuación se describe cada uno de ellos.



**Figura 2.** Metodología usada para el diseño de redes de distribución por métodos de optimización

**A. Capacidad y cobertura**

Este algoritmo minimiza la cantidad de transformadores a usar en el proyecto, obteniendo como resultado un número óptimo de transformadores a ser instalados, además el algoritmo entrega como resultado las coordenadas georeferenciadas de los sitios óptimos (centro de carga) donde se montará cada transformador. (25,28)

El despliegue de los transformadores en el escenario real considerando puntos candidatos con restricciones de cobertura es tratado como un problema de optimización. En la Tabla 1 se muestran los parámetros y variables para la metodología propuesta.

**Tabla 1.** Variables usadas en las ecuaciones de los modelos matemáticos de optimización

Nomenclatura	Descripción
$X_s, Y_s$	Sitios candidatos (latitud, longitud)
$X_u, Y_u$	Usuarios (latitud, longitud)
$N$	Número de usuarios
$M$	Número de sitios candidatos
$Y_j$	Usuario cubierto
$C$	Capacidad del transformador [kVA]
$X_{i,j}$	Enlace
$Z_i$	Cantidad de sitios activos
$R$	Vano de cobertura [km]
$P$	Porcentaje de cobertura de usuarios
$\alpha_{i,j}$	Cantidad de usuarios cubiertos
$S$	Conjunto de sitios candidatos para transformadores
$U$	Conjunto de usuarios

Fuente: Elaboración propia

El despliegue óptimo de transformadores para la conexión de los usuarios es una tarea fundamental para los ingenieros durante la planificación y ejecución de un proyecto eléctrico. En esta primera parte del trabajo se plantea como función objetivo minimizar la

cantidad de transformadores a instalar, que están sujetos a limitaciones de cobertura y capacidad de los transformadores. La función objetivo y sus restricciones se presentan en las Ecuaciones (1) - (5).

Función objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^M (Z_i) \tag{Ec. (1)}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^N (Y_j) \geq P * N \tag{Ec. (2)}$$

$$Y_i = \sum_{i=1}^M (X_{i,j}); \forall i \in S; \forall i \in U \tag{Ec. (3)}$$

$$\sum_{i=1}^N (X_{i,j}) \leq C * Z_i; \forall i \in S \tag{Ec. (4)}$$

$$X_{i,j} \leq \alpha_{i,j} * Z_i; \forall i \in S; \forall i \in U \tag{Ec. (5)}$$

La capacidad en potencia aparente (KVA) de cada uno de los transformadores que conforman la red de distribución se dimensiona en base a la Tabla 2, demanda máxima diversificada definida por la norma vigente de la empresa distribuidora para sistemas eléctricos de distribución.

**Tabla 2.** Demanda máxima diversificada (KW) (Fuente, empresa distribuidora)

#Usuarios	Estrato				
	A	B	C	D	F
10	23,3	17,0	12,6	8,0	5,6
11	25,2	18,4	13,6	8,6	6,1
12	27,1	19,8	14,7	9,3	6,5
13	29,1	21,2	15,8	10,0	7,0
14	31,0	22,6	16,8	10,6	7,4
15	32,9	24,0	17,8	11,3	7,9
16	34,8	25,4	18,8	11,9	8,4
17	36,7	26,7	19,8	12,6	8,8
18	38,6	28,1	20,9	13,2	9,3



19	40,3	29,4	21,8	13,8	9,7
20	42,3	30,9	22,9	14,5	10,2
21	44,1	32,1	23,8	15,1	10,6
22	46,0	33,5	24,9	15,8	11,0
23	47,6	34,7	25,7	16,3	11,4
24	49,2	35,8	26,6	16,8	11,8
25	50,6	36,9	27,4	17,3	12,1
26	52,2	38,1	28,2	17,9	12,5
27	53,9	39,3	29,2	18,5	12,9
28	56,4	41,1	30,5	19,3	13,5
29	57,3	41,8	31,0	19,6	13,7
30	59,0	43,0	31,9	20,2	14,2

Fuente: <http://ftp.eeq.com.ec>

Las restricciones de capacidad y cobertura del modelo de optimización se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Restricciones del modelo de optimización capacidad y cobertura.

Restricciones	Datos
1	200 Usuarios
2	36 Sitios candidatos para transformadores
3	0.100 km de radio de cobertura de cada Transformador
4	Capacidad de 60 usuarios por transformador
5	100% de Cobertura

Fuente: Elaboración propia

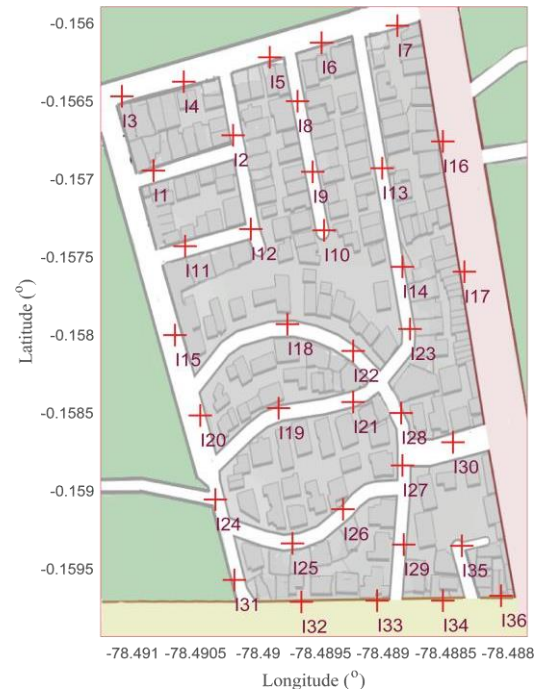
Haciendo uso de la plataforma web OpenStreetMap se ubica el polígono de estudio y se extrae las coordenadas reales georreferenciadas (Tabla 4) y una imagen en archivo \*.png del polígono, misma que servirá de fondo para todas las simulaciones del modelo. Toda esta información es ingresada al software de simulación (Matlab) donde están programados los modelos de optimización que determinaran la ruta más corta de red a construir con el menor número de transformadores a instalar ubicados en el centro de carga.

**Tabla 4.** Coordenadas del polígono en estudio

Parámetros	COORDENADAS	
Longitud	-78.49126	-78.48785
Latitud	-0.159940	-0.155900

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se aprecia el modelo previo a la optimización, con los 36 sitios candidatos donde el modelo de optimización busca los puntos más idóneos para la ubicación de los transformadores a instalar.



**Figura 3.** Sitios candidatos para ubicación óptima de transformadores

A continuación, se expone el pseudo código del Algoritmo 1 usado para la ubicación óptima de transformadores.

ALGORITMO 1

**Paso: 1.**

Definición de entradas:

- Coordenadas de los Usuarios (X,Y) y Transformadores (Xs,Ys).
- coord. U = (x1, y1), (x2, y2), . . . , xi, yj, . . . , (xN, yN) .
- coord. S = (xs1, ys1), (xs2, ys2), . . . , xsi, ysj, . . . , (xsN, ysN).
- Medición de la longitud del vector de Usuarios (N).
- Medición de la longitud del vector de Transformadores(M).

**Paso: 2.**

- Formación del super vector:

X=[x, xs];

Y=[y,ys];

- Medición de la longitud del súper vector (MN)

**Paso: 3.**

- Obtención de la matriz de distancias.
- Ingreso de radio de cobertura (dist = 0.05 km).  
 for todo i=1:NM  
   for todo j=1:NM  
      $dist(i,j)=\sqrt{((X(i)-X(j)))^2 + ((Y(i)-Y(j)))^2}$ .  
     Distancia Euclidiana  
   end for all  
 end for all

**Paso: 4**

- Formación del grafo G(E,V)
- Se crea la matriz de conectividad [G]   Donde:  
 1 = conectado  
 Infinito= no conectado
- Plot (G); Grafico la matriz de conectividad

**Paso: 5**

- Llamado a la librería [Dijkstra]; algoritmo para la determinación del camino más corto

**Paso: 6**

- Plot (G(E,V) ) Gráfica el árbol

**Paso: 7**

- Obtención de la mínima distancia del grafo.

El lugar donde está ubicada la nueva urbanización es un sitio de estrato social medio alto, por tal motivo se considera usuarios residenciales tipo B en función de la normativa vigente de la empresa distribuidora de energía. De acuerdo con la estratificación planteada se corre el programa de optimización de tipo entera, con el software LpSolve, una vez obtenida la respuesta óptima se ordena los datos y se exportan al modelo desarrollado en el software Matlab, obteniendo como resultado la ubicación y el número recomendable de los transformadores. En la Figura 4 se observa que de los 36 sitios candidatos propuestos en el polígono, se seleccionan 6 sitios óptimos, para la ubicación de 6 transformadores, los sitios óptimos son: 2, 13, 18, 23, 26, 29 y sus respectivos radios de cobertura.

Los resultados obtenidos de la primera optimización muestran la existencia de áreas de cobertura traslapadas, esto significa que el usuario que está inmerso en el traslape tiene la posibilidad de conectarse a cualquier transformador que su área de cobertura lo esté traslapando. Por ejemplo el usuario A de la Figura 4 tiene la opción de conectarse sea a TR18 o TR23 o TR26 o TR29. A cuál de los cuatro transformadores se conecta, esto lo

determina el modelo de optimización 1 en función de la distancia más corta, de esta manera se forma la red de bajo voltaje de cada transformador.

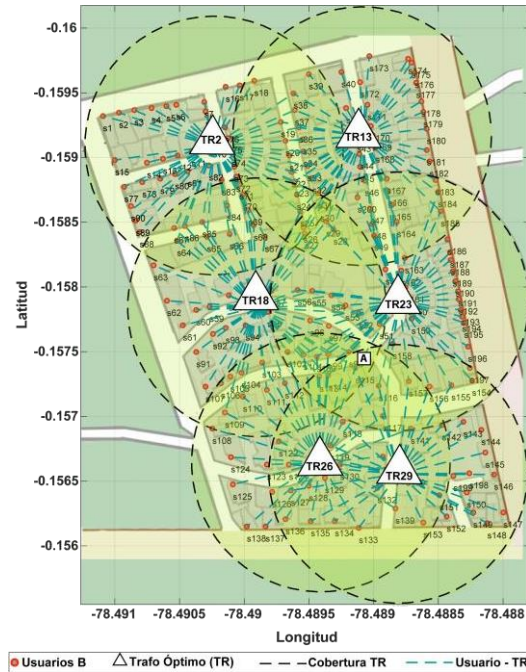


Figura 4. Ubicación Óptima de transformadores y radio de cobertura

En función de los resultados obtenidos en la optimización se conoce el número de usuarios a conectarse por transformador y de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2, “demanda diversificada (DMD)” se encuentra la demanda por transformador, con este dato, se dimensiona el transformador tomando en cuenta valores comerciales existentes en el mercado y criterios de reserva de potencia. En la Tabla 5 se presenta un resumen de los usuarios por transformador, siendo el transformador TR-18 el de mayor número de usuarios y TR-26 el de menor número de usuarios.

Tabla 5. Usuarios por transformador

Parámetros	TR-2	TR-13	TR-18	TR-23	TR-26	TR-29
No. de Usuarios	40	21	46	40	20	33
Demanda [kW]	55.3	32.1	62.4	55.3	30.9	46.8

Transforma	75.	45.	100.	75.	45.	60.
dor [kVA]	0	0	0	0	0	0
Carga [%]	77.	75.	65.7	77.	72.	82.
	6	1		6	3	1

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos con el modelo de optimización 1, sirven de datos de entrada para correr el segundo modelo de optimización. Estos datos son: el número óptimo de transformadores (6 transformadores), coordenadas de los sitios donde se montará los transformadores, coordenadas del poste desde donde se derivará la energía eléctrica para el proyecto, coordenadas de las calles y de los polígonos de cada uno de los lotes de terreno, para completar los datos de entrada del modelo se ingresan las coordenadas de los vértices de las calles donde se ubicarán los postes del alimentador primario, de esta manera se garantiza que la red eléctrica de tipo aérea estará ubicada siempre por las calles. Con estos datos se procede a formar la malla factible (mesh) como se muestra en la Figura 5.

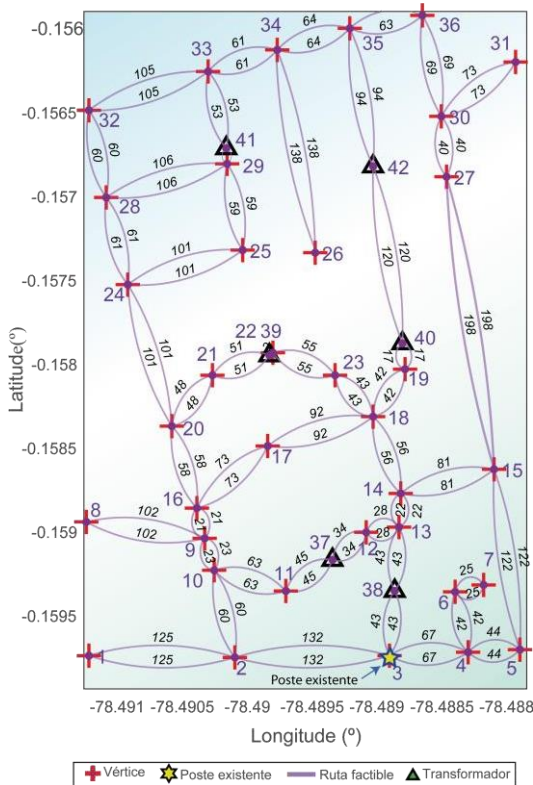


Figura 5. Malla factible (mesh)

La nueva red de medio voltaje inicia en el poste existente, desde allí tiene varias rutas que podría tomar, siendo ese el objetivo de este segundo modelo de optimización, determinar que ruta es la más corta. A continuación, se detalla el seudo código del Algoritmo 2.

ALGORITMO 2

```

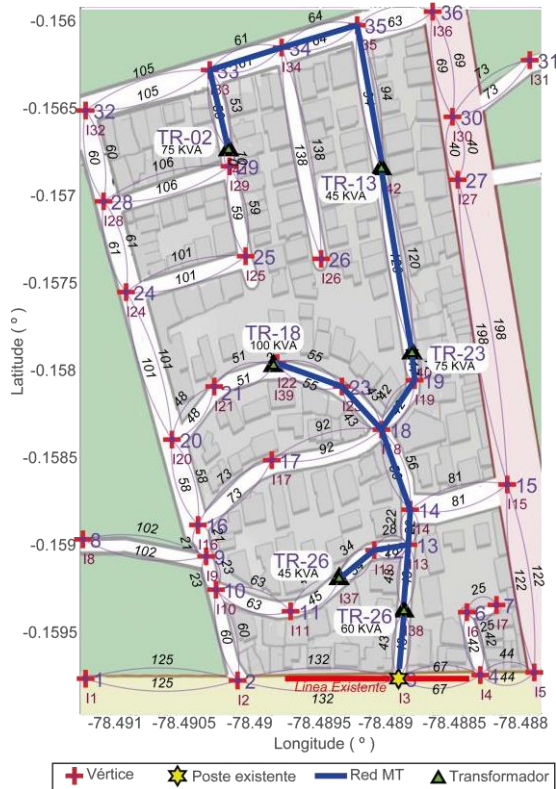
Paso: 1
- Algoritmo para la creación de los puntos
  georreferenciados (mesh)
- Exportar datos de grafo georreferenciado de
  OpenStreetMap
Inicio:
- Extraer en (Xv,Yv) las coordenadas de las viviendas.
- Extraer en (calles) las coordenadas de las calles.
Paso: 2
- M número de viviendas del mapa
  Para todo: i<=M
Si: (Xv,Yv)<=3
Paso: 3
Clusterización (Xv,Yv)
  Para todo: a=size(Xco,Yco)
  Para todo: b=size(calles)
  Dista,b=(Xco,Yco;calles)
  Fin Para
  Fin Para
Paso: 4
- Si: Dist a,b ≤ Dist min
  Buscar Dist a,b en calles
  nod_calles(calles)
  Fin Si
- Caso contrario:
  Para todo: a=size(Xv,Yv)
  Para todo: b=size(calles)
  Dista,b=(Xv,Yv;calles)
  Fin Para
  Fin Para
Paso: 5
- Buscar Dist a,b en calles
  Si: Dist a,b ≤ D istmin
  nod_calles(calles)
  Fin Para
  Fin
  
```

El Algoritmo 2 está conformado por técnicas de clusterización y la librería denominada Dijkstra basada en los conceptos de teoría de grafos para encontrar la ruta más corta, por ende de costo mínimo de construcción de la red eléctrica de medio voltaje, los resultados de la ruta más corta generado por el algoritmo resulta de mucha importancia para calcular la caída de tensión. La topología encontrada para el diseño del alimentador primario que dota de energía eléctrica a los 6 transformadores sigue una configuración radial o tipo árbol, la cual será construida con un conductor de aluminio



desnudo tipo ASCR calibre 1/0 AWG, a un nivel de voltajes 13.8 kV (25–27).

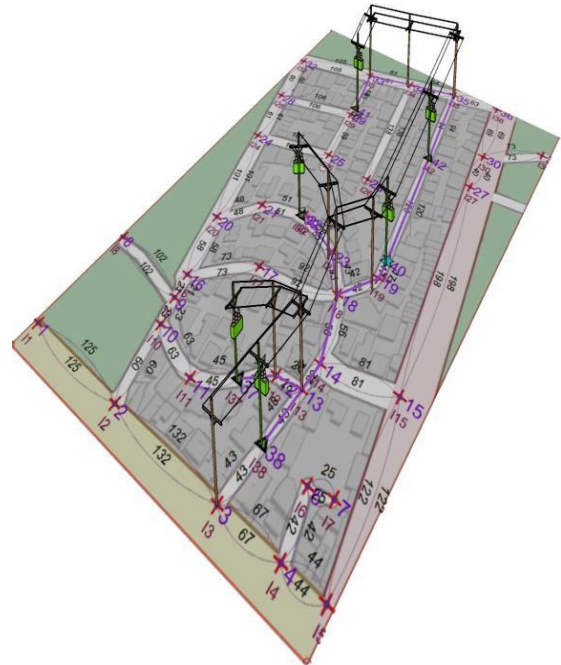
Dentro de las condiciones para la creación de la topología, se tienen que los recorridos de los alimentadores se realizan por las diferentes calles del polígono en estudio. Para la creación de los recorridos de los flujos desde el arranque del circuito (red existente) hacia cada transformador que pertenece a un estrato y alimentador se lo realiza mediante el problema de Enrutamiento para Múltiples Flujos. Los resultados obtenidos, una vez corrido el Algoritmo 2 se muestran en la Figura 6.



**Figura 6.** Árbol de mínima expansión (menor distancia)

De los datos obtenidos se deduce que la longitud total del alimentador primario es de 778 metros, se tiene un costo referencial de 35,00 USD por km de alimentador primario trifásico incluyendo mano de obra y materiales; esto implica que la construcción del alimentador primario del presente proyecto costará aproximadamente 27.230,00 USD, a

esto se le deberá sumar el costo de los transformadores y la red de bajo voltaje y el alumbrado público. En la Figura 7 se sintetiza mediante una gráfica isométrica el resultado obtenido del diseño eléctrico de redes de distribución por métodos de optimización.



**Figura 7.** Planeación Óptima de la expansión de redes de distribución

### 3. Resultados

En la Tabla 6 se aprecia que, el diseño propuesto tiene una distancia de red de MT de 778 metros, mientras que el diseño clásico presenta una distancia de red de MT de 1187 metros. En cuanto al número de transformadores el diseño clásico instala 7 transformadores, el diseño propuesto instala 6. Con la metodología propuesta se reduce en 409 metros la red de media tensión, representando una reducción económica de 14.315,00 USD.

En la Figura 8 se resume la red actual de MT diseñada bajo la normativa de la empresa distribuidora, que hasta la fecha utiliza métodos convencionales para su diseño, versus los resultados obtenidos bajo la metodología de optimización propuesta. 3 sitios óptimos de

transformadores y 272 metros de alimentador primario coinciden entre los 2 métodos.

Tabla 6. Comparación de la metodología propuesta vs metodología convencional

Parámetros	LONGITUD TOTAL EN (M)	PRECIO UNITARIO POR (M) RED MT	NÚMERO DE TRANSFORMADORES	COSTO TOTAL (USD)
Diseño de red método por optimización	778	\$ 35,00	6	\$ 27.230,00
Diseño de red método convencional	1187	\$ 35,00	7	\$ 41.545,00
<b>Diferencias</b>	<b>409</b>		<b>1</b>	<b>\$ 14.315,00</b>

Fuente: Elaboración propia

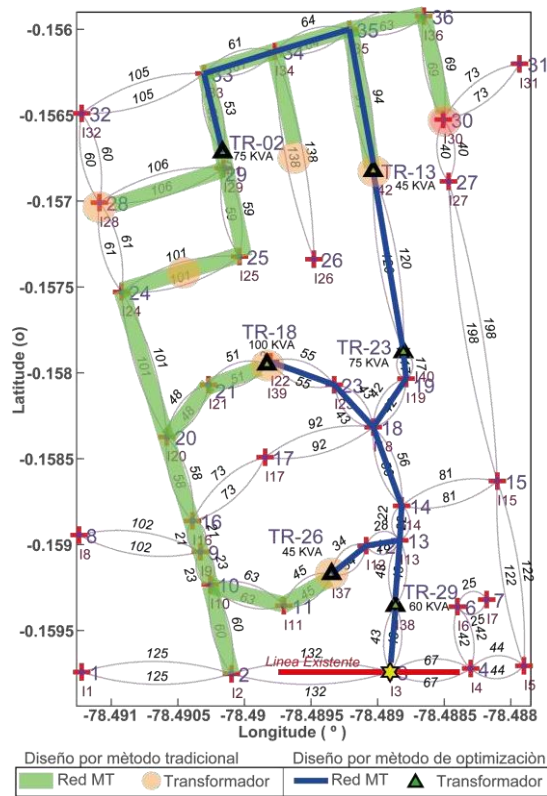


Figura 8. Comparación de red MT diseñada por metodología convencional vs red diseñada por metodología de optimización.

Los perfiles de voltaje y corriente obtenidos con la metodología propuesta se resumen en la Figura 9, donde la caída de tensión máxima es del 0.6 % equivalente a 119,9567 V, manteniéndose dentro de los límites permitidos

por la empresa distribuidora de energía. Este es el caso del transformador más distante TR2 que se ubica a 619,27 metros. Otro dato importante es la cargabilidad de los transformadores y de los conductores del alimentador primario.

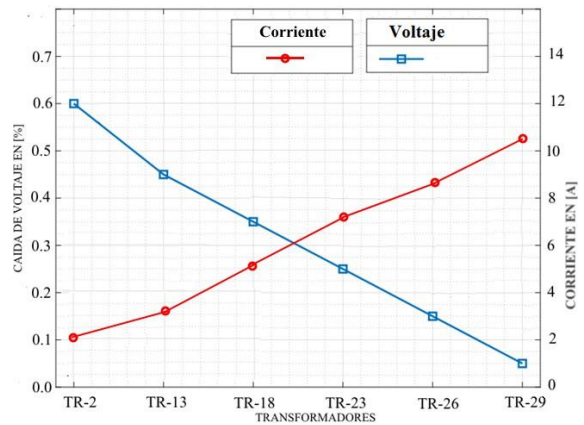
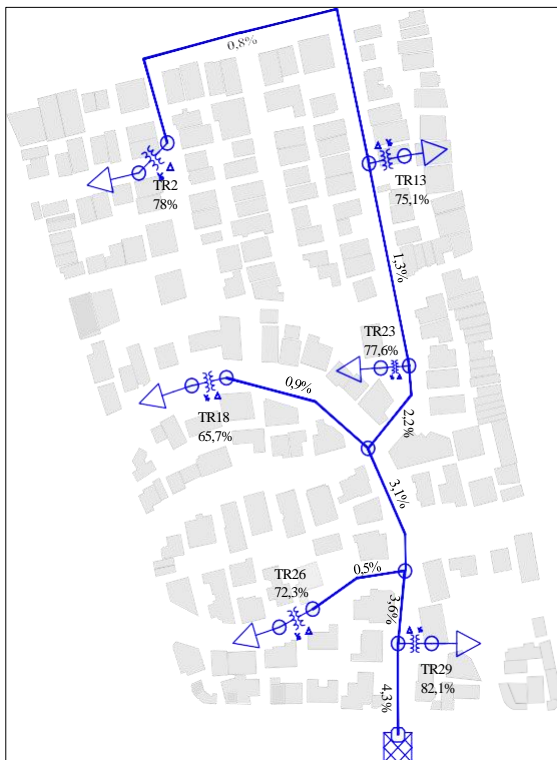


Figura 9. Caída de tensión por transformador vs Corriente.

En la Figura 10 se describe la carga en primera instancia de los transformadores. TR29 presenta el mayor índice de carga con un 82.1%. Y en segunda instancia la carga de ESTA línea, no supera 2.1%. Esto evidencia que el algoritmo optimiza el dimensionamiento de la red, logrando que este se mantenga en perfiles de voltaje admisibles (>92%), cargabilidad de los transformadores (ningún transformador llega al

100%) y la carga de las líneas, en ningún tramo logra superar 4.3%.

El presente trabajo propone una metodología para diseñar redes eléctricas de distribución, mediante modelos de optimización y teoría de grafos, el primer modelo determinó la ubicación óptima de los transformadores, se propuso 36 sitios candidatos, el modelo optimizo y determinó 6 sitios óptimos, tomando en cuenta aspectos restrictivos de: capacidad y cobertura. El segundo modelo determinó la ruta más corta del alimentador primario de media tensión. Con esta información se modeló el sistema eléctrico en el programa CYMEDIS y se obtuvieron parámetros eléctricos de caída de tensión, cargabilidad de las líneas y transformadores, flujos de potencias, ubicación geo referenciada de los transformadores y alimentador primario, datos que no se obtienen con el método tradicional de diseño.



**Figura 10.** Perfiles de carga del sistema de distribución.

La capacidad de los transformadores fue dimensionada en función del número de

usuarios a conectarse a cada transformador. De los resultados obtenidos el transformador de mayor capacidad es de 100 kVA (TR-18) con 46 usuarios conectados y el transformador de menor capacidad es de 45 kV (TR-26) con 20 usuarios conectados, considerando el consumo aproximado por usuarios de estrato tipo B de 3.5 kW, 3.68 kVA asumiendo un factor de potencia de 0.95.

Se obtuvo una longitud total optimizada de 778 metros de alimentador primario, se tiene un costo referencial de 35,000 USD por km de alimentador primario trifásico, incluye mano de obra y materiales. Esto implica que la construcción del alimentador primario del presente proyecto costará aproximadamente 27.230,00 USD y 41.545,00 USD con el diseño convencional. Por lo tanto, con la metodología de diseño propuesto se logra reducir los costos de construcción en 14.315,00 USD; se propone la instalación de 6 transformadores con la metodología propuesta, mientras que el diseño convencional instala 7 transformadores.

El flujo de potencia después del planteamiento de la optimización permite que los índices de cargabilidad de los diferentes componentes nunca lleguen a niveles de sobrecarga (transformador TR29 = 82.1% y líneas no superan el 4,3%). Y las caídas de voltaje nunca superen el máximo permitido (el tramo que traslada la energía al TR2 el transformador más lejano no es inferior a 119,9567 V). Optimizando la infraestructura empleada y permitiendo una adecuada planeación del sistema de distribución. El método propuesto no solamente permite la validación de los cálculos con software especializado, sino también, la planeación de la red bajo una subcapa georreferenciada en un ambiente con parámetros próximos a la realidad.

La metodología propuesta permite establecer escenarios óptimos desde el punto de vista económico, pero dichos escenarios no siempre son los más eficientes vistos desde la parte

técnica. Por tal motivo una vez logrado el árbol de mínima expansión de la red de medio voltaje se procede a simular dicha red mediante el software Cymdist. Los parámetros eléctricos encontrados en la simulación de flujos de potencia de la red eléctrica deben estar enmarcados dentro de la normativa impuesta por la empresa distribuidora de energía eléctrica. En caso de no cumplir los parámetros eléctricos se vuelve al Algoritmo 1 se replantea la ubicación de los sitios candidatos para transformadores, se vuelve a correr los 2 modelos de optimización y se comprueba con la simulación eléctrica en el software Cymdist. Una vez cumplidos los parámetros eléctricos se tiene un diseño óptimo tanto técnico como económico.

Un trabajo futuro que complemente el presente estudio podría consistir en analizar minuciosamente los parámetros eléctricos de la red eléctrica de distribución iniciando con la corrida de flujos de potencia correspondiente al árbol de mínima expansión con el software Cymdist, el cual tiene muchas prestaciones para la construcción, planeación, análisis de contingencias y optimización de redes eléctricas de distribución. Una planificación de la expansión de la red eléctrica se la podría ejecutar asumiendo demandas randómicas normalizadas en varios rangos de demanda, de esta manera se podría representar los diferentes tipos de clientes que pueden existir desplegados a lo largo de todo un alimentador primario de distribución.

#### 4. Conclusiones.

El presente trabajo propone una metodología para diseñar redes eléctricas de distribución, mediante modelos de optimización y teoría de grafos, el primer modelo determinó la ubicación óptima de los transformadores, se propuso 36 sitios candidatos, el modelo optimizo y determinó 6 sitios óptimos, tomando en cuenta aspectos restrictivos de: capacidad y cobertura. El segundo modelo determinó la ruta

más corta del alimentador primario de media tensión. Con esta información se modeló el sistema eléctrico en el programa CYMEDIS y se obtuvieron parámetros eléctricos de caída de tensión, cargabilidad de las líneas y transformadores, flujos de potencias, ubicación geo referenciada de los transformadores y alimentador primario, datos que no se obtienen con el método tradicional de diseño.

La capacidad de los transformadores fue dimensionada en función del número de usuarios a conectarse a cada transformador. De los resultados obtenidos el transformador de mayor capacidad es de 100 kVA (TR-18) con 46 usuarios conectados y el transformador de menor capacidad es de 45 kV (TR-26) con 20 usuarios conectados, considerando el consumo aproximado por usuarios de estrato tipo B de 3.5 kW, 3.68 kVA asumiendo un factor de potencia de 0.95.

Se obtuvo una longitud total optimizada de 778 metros de alimentador primario, se tiene un costo referencial de 35,000 USD por km de alimentador primario trifásico, incluye mano de obra y materiales. Esto implica que la construcción del alimentador primario del presente proyecto costará aproximadamente 27.230,00 USD y 41.545,00 USD con el diseño convencional. Por lo tanto, con la metodología de diseño propuesto se logra reducir los costos de construcción en 14.315,00 USD; se propone la instalación de 6 transformadores con la metodología propuesta, mientras que el diseño convencional instala 7 transformadores.

El flujo de potencia después del planteamiento de la optimización permite que los índices de cargabilidad de los diferentes componentes nunca lleguen a niveles de sobrecarga (transformador TR29 = 82.1% y líneas no superan el 4,3%). Y las caídas de voltaje nunca superen el máximo permitido (el tramo que traslada la energía al TR2 el transformador más lejano no es inferior a 119,9567 V). Optimizando la infraestructura empleada y



permitiendo una adecuada planeación del sistema de distribución. El método propuesto no solamente permite la validación de los cálculos con software especializado, sino también, la planeación de la red bajo una subcapa georreferenciada en un ambiente con parámetros próximos a la realidad.

La metodología propuesta permite establecer escenarios óptimos desde el punto de vista económico, pero dichos escenarios no siempre son los más eficientes vistos desde la parte técnica. Por tal motivo una vez logrado el árbol de mínima expansión de la red de medio voltaje se procede a simular dicha red mediante el software Cymdist. Los parámetros eléctricos encontrados en la simulación de flujos de potencia de la red eléctrica deben estar enmarcados dentro de la normativa impuesta por la empresa distribuidora de energía eléctrica. En caso de no cumplir los parámetros eléctricos se vuelve al Algoritmo 1 se replantea la ubicación de los sitios candidatos para transformadores, se vuelve a correr los 2 modelos de optimización y se comprueba con la simulación eléctrica en el software Cymdist. Una vez cumplidos los parámetros eléctricos se tiene un diseño óptimo tanto técnico como económico.

Un trabajo futuro que complementa el presente estudio podría consistir en analizar minuciosamente los parámetros eléctricos de la red eléctrica de distribución iniciando con la corrida de flujos de potencia correspondiente al árbol de mínima expansión con el software Cymdist, el cual tiene muchas prestaciones para la construcción, planeación, análisis de contingencias y optimización de redes eléctricas de distribución. Una planificación de la expansión de la red eléctrica se la podría ejecutar asumiendo demandas randómicas normalizadas en varios rangos de demanda, de esta manera se podría representar los diferentes tipos de clientes que pueden existir desplegados a lo largo de todo un alimentador primario de distribución.

## 5. Financiación

Los autores declaran que no recibieron financiación de ninguna entidad público / privada para la realización de este artículo.

## 6. Referencias

1. Valenzuela A, Montalvo I, Inga E. A decision-making tool for electric distribution network planning based on heuristics and georeferenced data. *Energies* [Internet]. 2019;12(21). Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/21/4065>
2. Li R, Wang W, Chen Z, Jiang J, Zhang W. A review of optimal planning active distribution system: Models, methods, and future researches. *Energies* [Internet]. 2017;10(11):1–27. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1715>
3. Raut U, Mishra S. Power distribution network reconfiguration for loss minimization using a new graph theory based genetic algorithm. 2017 IEEE Calcutta Conf CALCON 2017 - Proc [Internet]. 2018;2018-Janua:1–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8280684>
4. Cadenovic R, Jakus D, Sarajcev P, Vasilj J. Optimal distribution network reconfiguration through integration of cycle-break and genetic algorithms. *Energies* [Internet]. 2018;11(5). Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1278>
5. Zahedi Vahid M, Ali ZM, Seifi Najmi E, Ahmadi A, Gandoman FH, Aleem SHEA. Optimal allocation and planning of distributed power generation resources in a smart distribution network using the manta ray foraging optimization algorithm. *Energies* [Internet]. 2021;14(16):1–24. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/1278>

- 1073/14/16/4856
6. Guarda FGK, Junior GC, Da Silva CDL. Fault current limiter placement to reduce recloser-fuse miscoordination in electric distribution systems with distributed generation using multiobjective particle swarm optimization. *IEEE Lat Am Trans* [Internet]. 2018;16(7):1914–20. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447357>
  7. Girbau-Llistuella F, Díaz-González F, Sumper A, Gallart-Fernández R, Heredero-Peris D. Smart grid architecture for rural distribution networks: Application to a Spanish Pilot Network. *Energies* [Internet]. 2018;11(4):9–12. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/844>
  8. Müller UP, Schachler B, Scharf M, Bunke WD, Günther S, Bartels J, et al. Integrated techno-economic power system planning of transmission and distribution grids. *Energies* [Internet]. 2019;12(11):1–30. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2091>
  9. Villacres F, Inga E. Planeación y dimensionamiento de redes eléctricas de distribución soterrada mediante un método metaheurístico. *Ing y Cienc* [Internet]. 2019;15(30):141–66. Available from: <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/issue/view/566>
  10. Kong L, Xiao J, Zhou H, Wang B. Planning method for distribution networks based on load growth characteristics of the industry. *China Int Conf Electr Distrib CIGRE* [Internet]. 2016;2016-Sept(Ciced):10–3. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7576332>
  11. Fletcher J, Fernando T, Iu H, Reynolds M, Fani S. A case study on optimizing an electrical distribution network using a genetic algorithm. *IEEE Int Symp Ind Electron* [Internet]. 2015;2015-Sept:20–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7281437>
  12. Jiménez-Estévez GA, Vargas LS, Palma-Behnke R. An evolutionary approach for the greenfield planning problem in distribution networks. *IEEE Int Conf Neural Networks - Conf Proc* [Internet]. 2007;1744–9. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4371221>
  13. Dumbrava V, Ulmeanu P, Duquenne P, Lazaroiu C, Scutariu M. Expansion planning of distribution networks by heuristic algorithms. *Proc Univ Power Eng Conf* [Internet]. 2010;(January 2010). Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5649474>
  14. Carrano EG, Guimarães FG, Takahashi RHC, Neto OM, Campelo F. Electric distribution network expansion under load-evolution uncertainty using an immun system inspired algorithm. *IEEE Trans Power Syst* [Internet]. 2007;22(2):851–61. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4162579>
  15. Deka D, Backhaus S, Chertkov M. Structure learning in power distribution networks. *IEEE Trans Control Netw Syst* [Internet]. 2018;5(3):1061–74. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7862849>
  16. Capelini RM, Ferraz GMF, Salustiano R, Neto ETW, Pereira ML, Oliveira AR, et al. Methodology for fast fault location in overhead distribution networks by the application of temporary georeferenced fault indicators. *ICHVE 2016 - 2016 IEEE Int Conf High Volt Eng Appl* [Internet]. 2016;6–9. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7800880>
  17. Villasana R, Member S, Urdaneta a J.

- Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits. *Power* [Internet]. 2004;19(2):996–1004. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1295010>
18. Antoniadou-Plytaria KE, Koutsoukis NC, Sergaki ES, Georgilakis PS. Multiyear power distribution planning considering voltage regulator placement. *IET Conf Publ.* 2016;2016(CP711):1–6.
  19. Samui A, Singh S, Ghose T, Samantaray SR. A direct approach to optimal feeder routing for radial distribution system. *IEEE Trans Power Deliv* [Internet]. 2012;27(1):253–60. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6051510>
  20. Campaña M, Inga E, Hincapié R. Optimal placement of universal data aggregation points for smart electric metering based on hybrid wireless. *CEUR Workshop Proc* [Internet]. 2017;1950(October):6–9. Available from: <http://ceur-ws.org/Vol-1950/paper2.pdf>
  21. Wang R, Wu J, Qian Z, Lin Z, He X. A Graph Theory Based Energy Routing Algorithm in Energy Local Area Network. *IEEE Trans Ind Informatics* [Internet]. 2017;13(6):3275–85. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7942052>
  22. Chen Y, Wang S, Yu J, Li W, Shi X, Yang W. Optimal weighted voronoi diagram method of distribution network planning considering city planning coordination factors. 2017 4th Int Conf Syst Informatics, ICSAI 2017 [Internet]. 2017;2018-Janua(Icsai):335–40. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8248314>
  23. Chunguang H, Jiaming Z, Xin D, Lei W, Guangxin Z, Xiaolin X, 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* [Internet]. 2017;1767–71. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8054316>
  24. Lichtinghagen J, Sieberichs M, Moser A, Kübler A. Medium voltage network planning considering the current network and geographical restrictions. 2017 6th Int Conf Clean Electr Power Renew Energy Resour Impact, ICCEP 2017 [Internet]. 2017;689–93. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8004765>
  25. Diaz-Dorado E, Cidras J, Miguez E. Application of Evolutionary Algorithms for the Planning of Urban Distribution Networks of Medium Voltage. *IEEE Power Eng Rev* [Internet]. 2002;22(7):58. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4312408>
  26. Peralta A, Inga E, Hincapié R. Optimal Scalability of FiWi Networks Based on Multistage Stochastic Programming and Policies. *J Opt Commun Netw* [Internet]. 2017;9(12):1172. Available from: <https://www.osapublishing.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-9-12-1172>
  27. E. Inga. Scalable Route Map for Advanced Metering Infrastructure Based on Optimal Routing of Wireless Heterogeneous Networks. *IEEE Wirel Commun* [Internet]. 2017;(April):26–33. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7909154/>
  28. Naor J, Panigrahi D, Singh M. Online node-weighted Steiner tree and related problems. *Proc - Annu IEEE Symp Found Comput Sci FOCS* [Internet]. 2011;210–9. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6108170>
  29. Han X, Liu J, Liu D, Liao Q, Hu J, Yang Y. Distribution network planning study

- with distributed generation based on Steiner tree model. Asia-Pacific Power Energy Eng Conf APPEEC [Internet]. 2014;2015-March(March):2–6. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7066185>
30. Gao YP, Yang ZX. An artificial immune algorithm for minimal steiner tree problems. Int Conf Adv Mechatron Syst ICAMechS [Internet]. 2013;(71071078):693–7. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6681731>
31. Wang C, Liang H, Geng X, Zhu M. 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 [Internet]. 2015;180–4. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7063707>