

**DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN CON
GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO FUENTES DE ENERGÍA
FOTOVOLTAICA**

**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 CON GENERACIÓN
DISTRIBUIDA USANDO FUENTES DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

**AUTOR:
FRANCISCO JAVIER PARREÑO PONCE**

**DIRECTOR:
JUAN ALBERTO BUCHELI ÁVILA**

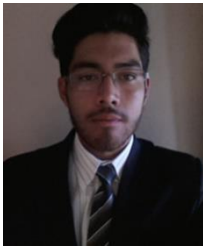
Quito, diciembre 2018

Francisco Javier Parreño Ponce

**DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN
DISTRIBUIDA USANDO FUENTES DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Francisco Javier Parreño Ponce (Y'1994-M'09). Realizó sus estudios secundarios en el colegio Técnico Experimental Salesiano Don Bosco en la especialidad de Electricidad Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Redes de Distribución con la inclusión de Generación Distribuida.
fparreno@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Juan Alberto Bucheli Ávila (Y'1960-M'01). Se graduó de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana y Magister en Gestión de Energías en la Universidad Técnica del Cotopaxi. Actualmente se desempeña como Docente titular auxiliar nivel 1 en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: Energía eólica, Energía renovable, Máquinas eléctricas, Generación distribuida, Energía fotovoltaica.
jbucheli@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS
RESERVADOS
©2017 Universidad
Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Juan Alberto Bucheli Ávila declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Despliegue óptimo de redes de distribución con generación distribuida usando fuentes de energía fotovoltaica* realizado por Francisco Javier Parreño Ponce, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre 2018



.....
Juan Alberto Bucheli Ávila

Cédula de identidad: 1706576210

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Francisco Javier Parreño Ponce, con documento de identificación N° 172263458-9, 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/titulación intitulado: “DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO FUENTES DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA”, 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.

Firma



Nombre: Francisco Javier Parreño Ponce

Cédula: 172263458-9

Fecha: Quito, Diciembre 2018

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract.....	1
1. Introducción.....	2
2. Planeación de la red de distribución.....	4
2.1 Steiner Tree y K-Medoids para redes de distribución.....	5
3. Planteamiento del problema	6
4. Análisis de Resultados.....	9
5. Conclusiones y Recomendaciones	12
6. Trabajos Futuros.....	12
7. Referencias	13
7.1 Estado del Arte:.....	17
7.2 Resumen de indicadores	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Despliegue de Redes de Distribución con Generación Fotovoltaica	3
Figura 2. Despliegue de red de MT y distribución de cargas en transformadores caso 1 ...	9
Figura 3. Despliegue óptimo de la red de distribución caso 1.....	10
Figura 4. Despliegue óptimo de la red de distribución con GD caso 1	10
Figura 5. Despliegue de red de MT y distribución de cargas en transformadores caso 2 .	11
Figura 6. Despliegue óptimo de la red de distribución con GD caso 2	12
Figura 7. Caídas de tensión con GD y sin GD	12

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Líneas seleccionadas mediante optimización caso 1.....	9
Tabla 2. Resultados de la Optimización de la red de distribución	10
Tabla 3. Líneas seleccionadas mediante optimización caso 2.....	11
Tabla 4. Resultado de la Optimización caso 2	11

DESPLIEGUE ÓPTIMO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA USANDO FUENTES DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Resumen

Este artículo propone un método para el despliegue de redes de distribución que permite optimizar el camino de conexión en las redes de electrificación, considerando la colocación de generación distribuida fotovoltaica. Se presenta una optimización en conjunto con procesos heurísticos que intentan minimizar costos por la utilización de recursos en un circuito de distribución. El método propuesto puede variar y ajustarse a los recursos que se necesite o se disponga para diferentes casos, es decir, se acopla a los requerimientos de la red. Los resultados que se obtienen permiten conocer el despliegue y enrutamiento de la red de distribución, minimizando costos y pérdidas en potencia activa; para ello se emplean métodos de optimización en conjunto con Steiner Tree y K-Medoids, además se emplea criterios técnicos para la ubicación de la generación distribuida, así se explora con éxito el principio de optimización en Matlab; obteniendo resultados satisfactorios en la planeación de la red.

Palabras *Clave:* Despliegue, Fotovoltaico, Generación Distribuida, Óptimo, Redes de Distribución.

Abstract

This article proposes a method for the deployment of distribution networks that allows optimizing the connection path in the electrification networks, considering the placement of distributed photovoltaic generation. An optimization is presented in conjunction with heuristic processes that try to minimize costs by the use of resources in a distribution circuit. The proposed method can vary and adjust to the resources that are needed or available for different cases, that is, it is adapted to the requirements of the network. The results obtained allow knowing the deployment and routing of the distribution network, minimizing costs and losses in active power; for this optimization methods are used with Steiner Tree and K-Medoids, in addition technical criteria are used for the location of the distributed generation, thus the principle of optimization in Matlab is successfully explored; obtaining satisfactory results in the planning of the network.

Keywords: Deployment, Photovoltaic, Distributed Generation, Distribution Networks.

1. Introducción

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) se componen por Generación, Transmisión, Distribución y en la actualidad, el usuario final también es considerado una etapa más del SEP ya que con las crecientes tecnologías el consumidor puede vender energía a la red. La energía eléctrica se produce en las centrales de generación, ésta se transporta para ser utilizada por los usuarios, continuando con la etapa de Distribución se conoce que es una de las últimas fases del SEP en la que se debe cumplir el objetivo de suministrar a la demanda presente y futura [1], [2].

La etapa de Distribución sufre diferentes variaciones ya que es un ciclo que se encuentra en constante cambio, a causa de las nuevas urbanizaciones (el aumento de habitantes) y el crecimiento de la industria, por ello se presenta pérdidas de potencia y deficiente regulación de voltaje, al ser la fase final del SEP es percibida directamente por los usuarios, por lo que es necesario entregar energía constante y de alta calidad [3], [4]. Por su importancia se requiere conocer modelos de planeación óptima para el despliegue de redes de distribución que se enfocan en mejorar y elevar las condiciones de seguridad y confiabilidad de la energía entregada a los usuarios, con métodos nuevos que faciliten un óptimo desempeño en el sistema. Los costos de estas inversiones, pérdidas técnicas, además de compensar restricciones operativas y físicas, componen el problema de planificación y proyectos de redes [5], [6].

Para optimizar las redes de distribución se ha utilizado diferentes métodos y algoritmos, como el Árbol de mínima expansión (MST) planteado para problemas de configuración de red, lo cual es una estrategia apropiada para reconfigurar la topología radial con menos pérdidas, junto con heurísticas se obtienen los resultados óptimos deseados los cuales despliegan las rutas más cortas con la finalidad de reducir recursos utilizados [7]–[9]. Por ello, para mitigar los problemas causados debido a la

expansión del sistema se plantean diversos esfuerzos con los que se podrían disminuir los diferentes inconvenientes para mejorar niveles de calidad [10]. Además, se busca entregar energía bajo condiciones ambientales adecuadas, es decir, minimizar la dependencia de combustibles fósiles utilizando fuentes de energía limpia, para ello se presenta la inclusión de generación distribuida (GD), estas son centrales pequeñas de energía eléctrica, las cuales se conectan a la red de distribución directamente en las cargas del sistema [11]–[14]. Las fuentes GD utilizan paradigmas de generación de energía disponibles en el mercado como; micro generadores, generación fotovoltaica (FV), eólica, entre otras, las cuales aún se encuentran en proceso de investigación y perfeccionamiento [14], [15].

Aquellas GD basadas en fuentes eólicas y solares (FV-GD) logran dominar el mercado de la electricidad por sus características propicias al medio ambiente y la gran disponibilidad de dichos recursos [16].

Se debe considerar que las FV-GD al no ser de naturaleza estable podrían causar la interrupción del accionar normal de la red de distribución debido a su topología radial, a su diseño para generación centralizada y para flujos unidireccionales; la alta penetración de FV-GD podría presentar problemas con la regulación de tensión, pérdidas en el sistema, armónicos, oscilaciones de voltaje y en los elementos de protección.

Aunque la energía solar presenta un abundante recurso, sufre variaciones de irradiación en escalas de tiempo, además de intermitencia por cobertura de nubes, esto provoca variaciones en la red ya que no existe inercia como en turbinas eólicas, por lo tanto, su potencia de salida puede cambiar en segundos [17]–[21].

Sin embargo, estas fuentes con una correcta selección, dimensionamiento y ubicación en la red, tomando en cuenta restricciones

técnicas y ambientales basados en el entorno variable de las fuentes de energía renovables, además de su costo de inversión pueden aportar a la red mejoras en su flujo de carga, en el perfil de tensión, en su confiabilidad y en la calidad de suministro

para clientes y proveedores de energía eléctrica [22]–[27].

Por lo tanto, se debe planificar como ingrese la GD en la red para obtener una gran aceptación en el sistema de distribución [15], [28].

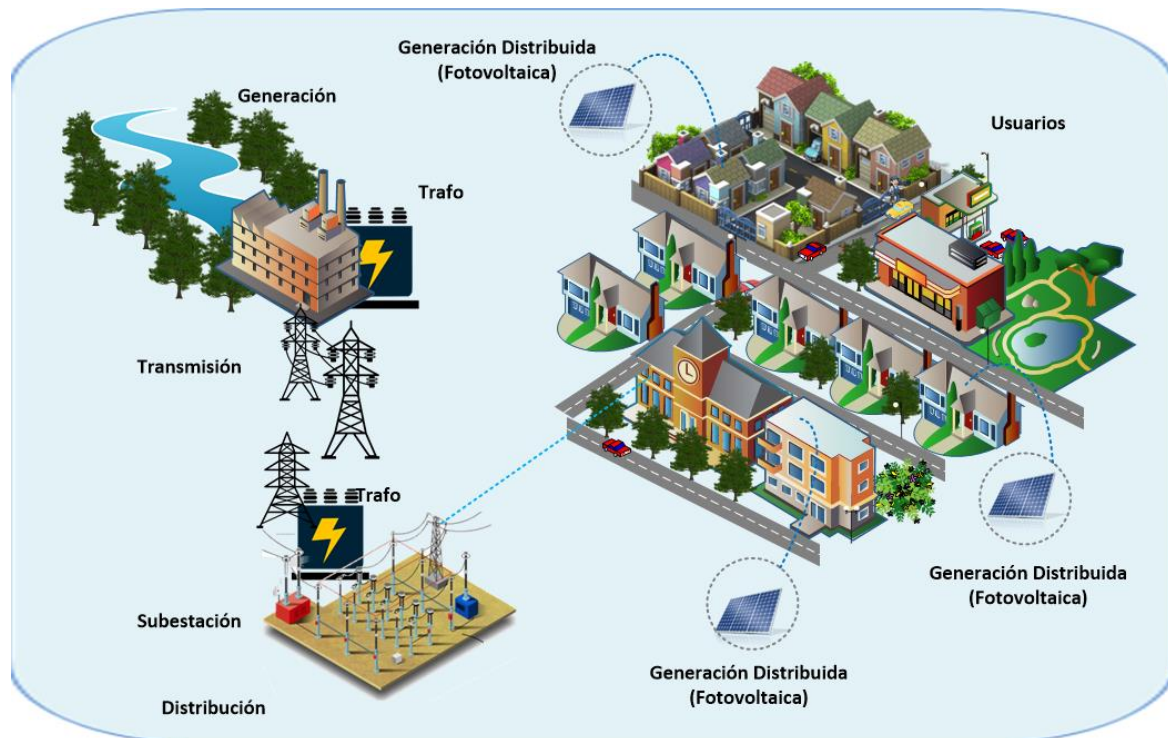


Figura 1. Despliegue de Redes de Distribución con Generación Fotovoltaica

Existen diversas investigaciones en cuanto a redes de distribución por los problemas y necesidades mencionadas en cuanto a la inclusión de generación renovable como en [29] en el cual se aplica el método de agrupamiento K-Means con LSF y dV normalizados para la correcta ubicación de GD en la red, se ha utilizado en [2] el algoritmo de Parámetros mejorados con el método óptimo de enjambre de partículas (PIPSO) para encontrar el lugar óptimo donde puede ingresar GD para reducir pérdidas en el sistema.

Además, la planificación de la red se torna cada vez más compleja por su influencia en la operación y gestión, por ello es importante el estudio de un óptimo despliegue de la red con generación

distribuida. Se ha tomado en cuenta que existen varios métodos para la configuración de redes de distribución como en [21] donde se aplica el algoritmo de Prim para encontrar el MST el cual es un caso basado en la búsqueda en primer lugar, así se encuentra las rutas más cortas en un gráfico, igualmente en [8] se propone el método de árbol de expansión mínimo junto con estrategias heurísticas mejoradas para la reconfiguración de la red. El método MST es utilizado en problemas en los cuales se presenta la configuración de la red de distribución donde se toma como una estrategia adecuada, pero, debido a que no se utiliza técnicas de optimización puede no obtener la solución más adecuada. En [30] el método de Steiner tree es utilizado para

buscar los caminos óptimos de conexión para la red de distribución, junto con una optimización del enjambre de partículas modificado presentando el mejor camino de la red de Distribución.

Para el presente trabajo se tiene como objetivo el encontrar el óptimo despliegue de una red de distribución en la cual se añada generación distribuida usando energía fotovoltaica de tal forma que el sistema minimice costos y pérdidas en potencia activa, mediante métodos de clusterización se determina la ubicación de transformadores, además se emplea Steiner tree junto con técnicas de optimización para encontrar la distribución de la red llegando a los usuarios finales sobre un escenario determinado por coordenadas X y Y.

Para modelar la red se considera: capacidad máxima de transformadores, demanda máxima de usuarios, tipo de usuario, restricciones de voltaje, características de cableado (ampacidad, resistencia y reactancia), longitudes de conductores, etc.

En adelante este documento es organizado de la siguiente manera. En la sección II se introduce a las características, requisitos e implementación de una red óptima de distribución con generación distribuida además se expone sobre los métodos y técnicas empleados en el desarrollo de la presente investigación. En la sección III se describe el planteamiento de la problemática. En la sección IV se analizan los resultados obtenidos a través de los escenarios planteados. Finalmente se realizan las conclusiones en la sección V

2. Planeación de la red de distribución

En la etapa de distribución se presentan cambios en los parámetros eléctricos debido a las variaciones en la demanda por parte de los usuarios y en el incremento del costo de recursos, además de pérdidas presentes en la red.

El objetivo de redes de distribución es brindar un servicio accesible y confiable a largo plazo, a la vez garantizar que los niveles de tensión y calidad de energía entregada a los usuarios se encuentren en rangos aceptables [31].

En el caso que el diseño de la red sea incorrecto, puede resultar en dos situaciones problemáticas: uno de ellos es un escenario subestimado, si el sistema se diseña bajo un escenario de carga infra estimada (es decir, el valor estimado es menor al valor real que se aplicará), no abastecerá las cargas en el tiempo de diseño. El segundo escenario es sobreestimado: si el sistema se diseña teniendo en cuenta un escenario de carga sobreestimada, será demasiado grande. Aunque se prevé que la red funcione correctamente en dichos casos, esta red será más costosa de lo necesario [32].

Para lograr una correcta asignación de recursos, el problema del diseño de la red de distribución se ha estudiado en las últimas dos décadas teniendo en cuenta metodologías de optimización.

El propósito es realizar un despliegue de la red que beneficie decisiones de inversión, operación y mantenimiento en un lapso de tiempo mínimo con una visión a largo plazo de las necesidades del usuario a un costo reducido minimizando longitud de conductores.

Las pérdidas de potencia en la red de distribución son una parte importante pero cuando el sistema se encuentra operando se requiere una reconfiguración de dicha red, acercando así al sistema a su óptima operación, en [8] se analiza la reconfiguración de la red de distribución mediante métodos que combinan (MST) con heurísticas mejoradas reduciendo pérdidas en potencia activa, el algoritmo del árbol de mínima expansión se utiliza para reconfigurar la red de una forma útil sin aplicar técnicas de optimización y se complementa con tres procedimientos para obtener mejores resultados.

Existen diversos métodos para dar una solución óptima a la red, en [33] se explora con éxito el grupo de algoritmos k-means y Dijkstra dando una solución óptima para satisfacer la demanda de electrificación en el sistema, basándose en criterios de minimización de pérdidas, capacidad y rendimiento, obteniendo el despliegue de la red, además de la ubicación de centros de transformación óptimos reduciendo esfuerzos computacionales debido al bajo procesamiento de datos.

De igual manera en [34] se considera una red de distribución con topología radial que proporciona una solución real ante fluctuaciones de potencia, debido a que si la fluctuación se produce en un nodo todo el sistema resultara afectado al igual que su interconexión, por ello se plantea que la optimización eleva la calidad de la operatividad de la red de distribución con la inclusión de GD, con la finalidad de obtener diversos resultados favorables mejorando la estabilidad del sistema de distribución.

Como se mencionó operadores de los sistemas de distribución, investigadores e ingenieros presentan esfuerzos para optimizar la red de distribución, teniendo como objetivos la mínima pérdida de potencia, costos de operación del sistema, efectos ambientales, oscilaciones del sistema y la congestión de la red. Para cumplir dichos objetivos se toma en cuenta la inclusión de generación distribuida fotovoltaica ya que aprovecha el abundante recurso solar, estos se sitúan localmente para reducir pérdidas de la red y mejorar el perfil de tensión, teniendo en cuenta los factores ambientales y técnicos para que la red no sufra inconvenientes [35].

Además, teniendo en cuenta que la demanda continúa creciendo y la expansión de la red existente se vuelve costosa y difícil, la incorporación de generación distribuida para proporcionar el alivio de la carga máxima se ha convertido en una alternativa optada por las empresas de distribución.

Debido a la creciente inclusión de estos recursos en la red se requieren nuevos métodos para realizar el óptimo despliegue del sistema sin perjudicar al existente o a su vez optar por una reestructuración con beneficios tanto técnicos como económicos [36].

En [14], [17], [23] se emplean diferentes algoritmos y métodos para encontrar la mejor ubicación de la generación fotovoltaica al igual que su impacto y su dimensionamiento, se emplea optimizaciones basadas en el algoritmo de enjambre de partículas (PSO), colonia de hormigas (ACO), colonia de abejas (ABC), búsqueda harmónica (HS) y Algoritmos Evolutivos además de optimizaciones de programación no lineal entera mixta MINLP o de MILP o MIP minimizando la pérdida total de potencia en el sistema. Por lo tanto, mediante la inclusión de GD se logra la reducción en las pérdidas de potencia y también se eleva la calidad en el perfil de tensión.

Para realizar un óptimo despliegue de la red de distribución se tiene en cuenta que el despliegue se debe realizar a partir de la subestación (S/E), el enrutamiento del sistema debe constar desde la red de media tensión hasta los usuarios finales, es decir, a la red de baja tensión, por lo tanto, se debe conocer la capacidad nominal del transformador MT/BT, el nivel de voltaje permitido y el tipo de carga a suministrar, así se conoce la cantidad de usuarios conectados a cada transformador.

2.1 Steiner Tree y K-Medoids para redes de distribución

Los métodos de clusterización emplean la agrupación de datos para dar una partición de elementos, estos métodos se han utilizado en diversas aplicaciones en redes de distribución como en la ubicación correcta de unidades de medida fasorial (PMU) y de generación distribuida. Uno de los métodos de agrupación más utilizados se le conoce como K-Medoids, el cual es un

algoritmo que clasifica o agrupa objetos por atributos en determinados grupos K, y toma como punto de referencia a un medoide, este puede ser un objeto existente próximo al centro del clúster (grupo de cosas similares) entre todo el grupo. [29], [37].

El método K-Medoids es una técnica de agrupación más robusta a diferencia del más utilizado K-Means pues en vez de minimizar la suma de distancias euclidianas, reduce la suma de diferencias por pares.

El proceso de este algoritmo se basa en crear particiones alrededor de los medoides, donde se escoge k objetos en secuencia los cuales deben estar centralmente ubicados, siendo los medoides iniciales, así intercambiando elementos seleccionados y no seleccionados se intenta reducir la función objetivo. El algoritmo viene siendo el siguiente [38], [39]:

Algoritmo

Paso 1: Referenciación del punto centro de los clusters

$$w_a = \text{valor}; a = 1, 2, \dots, k$$

Paso 2: Obtención del medoide más cercano a cada elemento

$$c_a = \{b: d(\varphi, \gamma_b, u_a) \leq d(\varphi, \gamma_b, u_l), l \neq a, b = 1 \dots n\}$$

Paso 3: Colocación de elementos de clusters

$$w_a = \frac{1}{|c_a|} \sum_{b \in c_a} \varphi, \gamma_b, \forall a$$

$|c_a|$ siendo el número de objetos del cluster

Paso 4: Reiterar desde el paso 2 y 3 hasta que se llegue a la solución óptima

Así este método se aplica para agrupar los nodos o cargas desde sus características de operación, sobre la base de la agrupación obtenida el nodo piloto en el cual se puede

ubicar los transformadores se establece para cada grupo.

Los problemas de árbol en distribución se emplean para complementar a los métodos de agrupación, difieren en dos tipos, que son hallar la derivación de árbol más larga y la más corta, la mejor opción es aquella que tiene pérdidas mínimas en la red, y se cumple al encontrar el resultado con menos conexiones o menos cable

Steiner tree, es de los métodos de optimización combinatoria más populares, es un árbol en el que se agregan puntos que no son parte del conjunto inicial para obtener la mínima interconexión posible, éste método se puede emplear para resolver problemas críticos en diferentes ciencias [40].

El problema Steiner puede ser expresado de la siguiente forma: para el grupo de puntos dado $W = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ al igual que el punto A_i , que intentará enlazar cada punto del grupo de puntos dado, y el conjunto de los bordes de la red son fragmentos de línea recta, en la red pueden conectarse dos puntos arbitrarios por medio de un grupo de bordes.

Steiner tree rectilíneo es una técnica para encontrar la red mínima de conectividad establecida por un conjunto horizontal y vertical de fragmentos de línea, los que conectan puntos aumentados que no pertenecían al conjunto de puntos dado que son denominados los puntos Steiner [41].

El algoritmo Steiner tree se aplica para reducir la distancia total del cable, junto con heurísticas establecidas considerando criterios técnicos y económicos se puede encontrar el despliegue óptimo de la red de distribución [42].

3. Planteamiento del problema

Como se mencionó anteriormente, el óptimo despliegue de la red con generación distribuida presenta beneficios tanto técnicos como económicos al sistema de distribución, por ello se plantea un proceso

que minimice costos por utilización de recursos requeridos sobre escenarios en el plano X y Y, para la implementación de una red aérea, los escenarios propuestos contienen cargas balanceadas, por lo tanto, se considera que se tiene un mismo tipo de usuario residencial, así todos los usuarios poseen una demanda máxima igual, para fines explicativos, se considera que los transformadores emplean una potencia nominal común, así la capacidad de usuarios (viviendas) que puede conectarse a cada transformador se puede calcular.

Se plantean dos escenarios donde los usuarios son divididos en grupos dependiendo de la capacidad de cargas que puede acoger cada transformador, la capacidad del transformador se calcula usando (1), así se conoce cuál es la cantidad de usuarios conectados a un transformador mediante su capacidad máxima [43].

$$Cap_{trans(kVA)} = \frac{[DMD(1.036) + D_{AP}] * (\%)}{FP} \quad (1)$$

Donde:

Cap_{trans(kVA)}, es la capacidad máxima en kVA de un transformador.

DMD, es la demanda máxima diversificada.

D_{AP}, es la demanda de alumbrado público en kW

FP, es el factor de potencia (0.95)

Para determinar la planeación de la red se asigna coordenadas X y Y a cada usuario, mediante el algoritmo de K-Medoids se conoce la ubicación y cantidad de usuarios permitidos para cada transformador dependiendo de la potencia nominal del mismo, de igual manera como resultado se obtiene la distancia entre cargas y entre transformadores, a continuación, se detalla el pseudocódigo que permite realizar la ubicación de transformadores dependiendo de su capacidad máxima.

Algoritmo para ubicación de transformadores

Paso 1: Entrada:

$X, Y; Cap_{max\ trafa}(1, n); Cap_{us\ trafa}(1, n); cost_{LT}(1, n); p_{max\ trafa}(1, n);$

Paso 2: Salida:

$If x, d;$

Paso 3: Clúster transformadores

$[if x, d] = kmedoids ([X, Y], k);$

Paso 4: Condiciones:

$k = N/Capsu\ trafa;$
for $\forall i = 1 - n_clústers(d)$
 $da = \#barrasen\ clúster(i);$
 $Cap_{us\ trafa(i)} < c;$
End_for

If $Max(pdema) > Max(m_{trafa}) * 0.98$

$j = 0;$

$k = k + 1;$

End if;

Paso 5: Repetir Paso 3 y Paso 4 hasta obtener una solución óptima

La respuesta obtenida depende del escenario propuesto, de la carga de cada usuario y la potencia nominal de cada transformador.

La segunda fase es la conectividad de la red tanto en media como en baja tensión la cual se realiza con Steiner tree y optimización MIP, como resultado se obtiene las rutas óptimas de conexión, mediante MIP se selecciona la mejor línea por la cual se lleva la energía a los usuarios

A continuación, se detalla el pseudocódigo de la heurística Steiner tree rectilíneo, el cual realiza el despliegue de la red de media tensión con restricción de calles obteniendo el enrutamiento de la red mediante la distancia mínima entre puntos de conexión conocidos como transformadores para los escenarios propuestos.

Algoritmo para el óptimo despliegue mediante Steiner tree

Paso 1: Entrada:

N ; $m_{trafo}(1, n)$; $m_{red}(1, n)$; $Cost_{Tr}(1, n)$;
 $pdn(1, n)$; Idx ; c ;

Paso 2: Salida:

$Cap_{tt}(1, n)$; $m_{red}(1, n)$; $Cap_{Lt_{mred}}(1, n)$;
 $Cost_{tot}(1, n)$; $Cost_{m_{red}}(1, n)$; $Cost_{tt}(1, n)$;

Paso 3: Cálculo de la distancia:

```
for  $\forall i = 1 \rightarrow n$ 
for  $\forall j = 1 \rightarrow n$ 
 $dist(i, j) = sqrt(x^2 + y^2)$ ;
end_for
end_for
```

Paso 4: Ruteo:

```
for  $\forall i = 1 \rightarrow n$ 
 $di(i) = 0$ ;
 $[ruta, costo] = Steiner(dist, in, dest)$ ;
 $cost(i) = costo$ ;
end_for
```

Se emplea el modelo de optimización MIP para conocer el óptimo despliegue de la red, minimizando costos de cableado y pérdidas de potencia así se denota que el problema de planeación óptima del sistema de distribución es la siguiente:

Función Objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n Clinea(i) * Long(i) * X(i) \quad (2)$$

Donde:

$Clinea$, es el Costo en dólares sobre metro (\$/m) asignado a una línea de distribución determinada desde el transformador hasta cada usuario $i \rightarrow n$

$Long$, es la longitud en metros (m) de una línea de conexión entre el transformador y cada usuario $i \rightarrow n$

X , es la variable de decisión $i \rightarrow n$

La ecuación (2) presenta restricciones en cuanto a la caída de tensión, para su cálculo se incluyen las características de cada línea

además de la longitud de cada cable a utilizar, como se muestra:

$$\Delta V = [Long * (R + X \tan(\varphi))] * \frac{S}{V} \quad (3)$$

Donde:

ΔV , es la caída de tensión admisible por cada línea.

$Long$, es la distancia en metros de cada conductor

R , es la resistencia característica de cada conductor presentada en ohms/km

L , es la reactancia característica de cada conductor presentada en ohms/km

S , es la potencia aparente a la cual se va a alimentar a las cargas

V , es la tensión con la que se alimentan las cargas.

La ecuación (3) denota que la variación de tensión en la red se ve afectada por la distancia a energizar, se obtiene mayor caída de tensión a mayor longitud de cable, la sumatoria de las caídas de tensión para un mismo transformador debe mantenerse en los límites establecidos para redes de distribución determinado como el 3% en distribución [43].

Para el problema de optimización se aplica la restricción de ampacidad del cable a conectar:

$$I_{cal} < Amp_{cable} \quad (4)$$

Donde:

I_{cal} , es la variable calculada mediante leyes de ohm, $I = S/V$

Amp_{cable} , se obtiene de las características del cable a utilizar

Con estas restricciones se puede llegar al óptimo enrutamiento de la red en el cual se conectan las variables seleccionadas con la ecuación (5):

$$\sum_{i=1}^n X(i) = 1 \quad (5)$$

Donde:

X , es la variable binaria de decisión $i \rightarrow n$

Con la ecuación (5) se plantea que solo una línea se puede conectar a cada carga desde el transformador. Así, se determina la conexión óptima de la red de distribución minimizando conductores y reduciendo pérdidas en la red.

La generación distribuida se incluirá una vez se obtenga el cálculo total de caídas de tensión, así la generación fotovoltaica respaldará al sistema con mayor problemática, esta generación toma un valor de 300 w por sus dimensiones y por el aporte que brinda a la red.

4. Análisis de Resultados

Se realiza el análisis de cada uno de los casos, en los escenarios propuestos, donde se encontrarán los usuarios distribuidos a lo largo del plano X y Y.

En la Figura 2, se presenta la distribución de cargas en cada vivienda teniendo un total de 31 usuarios, se considera que el despliegue se realiza para energizar un conjunto de viviendas nuevas, en la aplicación del método no se consideran viviendas o usuarios existentes representados en el plano. El algoritmo de K-Medoids ubica a los transformadores y a sus respectivas cargas.

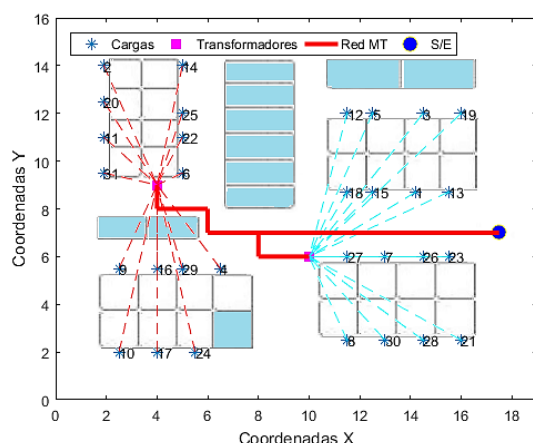


Figura 2. Despliegue de red de MT y distribución de cargas en transformadores caso 1

El algoritmo realiza una clusterización en la red de distribución y encuentra donde ubicar los transformadores tomando en cuenta la capacidad de cada carga y del transformador, para la implementación se considera usuarios tipo B con 16 viviendas

por energizar, con estas condiciones se calcula la potencia nominal del transformador siendo de 30 kVA disponible en el mercado.

Al conocer la capacidad de cada transformador y sus cargas respectivas se determina cual es la mejor ruta por la cual debe llegar la energía eléctrica a estos usuarios, para ello se utiliza la optimización MIP la cual determina el despliegue de la red de baja tensión, mediante una variable de decisión binaria presenta qué línea de conexión es la más adecuada para energizar al usuario como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Líneas seleccionadas mediante optimización caso 1

Línea	Carga	Transformador	Long(m)	Caída de Tensión(%)
L1	31	1	7.6	0.0655
L5	11	1	6.5	0.0560
L9	20	1	6.5	0.0560
L13	2	1	6.5	0.0560
L17	6	1	6.5	0.0560
L21	22	1	6.5	0.0560
L25	25	1	6	0.0517
L29	14	1	7	0.0603
L33	4	1	11	0.0948
L37	29	1	6.5	0.0560
L41	16	1	6	0.0517
L45	9	1	6.5	0.0560
L49	10	1	10.5	0.0904
L53	17	1	6.5	0.0560
L57	24	1	6.5	0.0560
L61	12	2	16.5	0.1421
L65	5	2	6	0.0517
L69	3	2	7	0.0603
L73	19	2	6.5	0.0560
L77	18	2	6	0.0517
L81	15	2	6	0.0517
L85	1	2	6.7	0.0577
L89	13	2	6.3	0.0543
L93	27	2	6.5	0.0560
L97	7	2	6.5	0.0560
L101	26	2	6.5	0.0560
L105	23	2	6	0.0517
L109	8	2	10	0.0861
L113	30	2	6.5	0.0560
L117	28	2	6.5	0.0560
L121	21	2	6.5	0.0560

Así, se obtiene el enrutamiento de la red de distribución mediante restricciones de caídas de tensión admisibles, además si la sumatoria total de dichas caídas de tensión para cada transformador es mayor al 3% el sistema presenta una ruta diferente hasta que se produzca la óptima conexión que no sobrepase este límite de tensión, para el caso de estudio, la red se despliega con un mismo conductor de 2/0 AWG debido a que los transformadores no presentan una caída de tensión considerable, por lo tanto la red presentada en la Figura 3 despliega el óptimo enrutamiento del sistema de distribución, entregando a los usuarios o cargas una red que presenta minimización en costos y pérdidas.

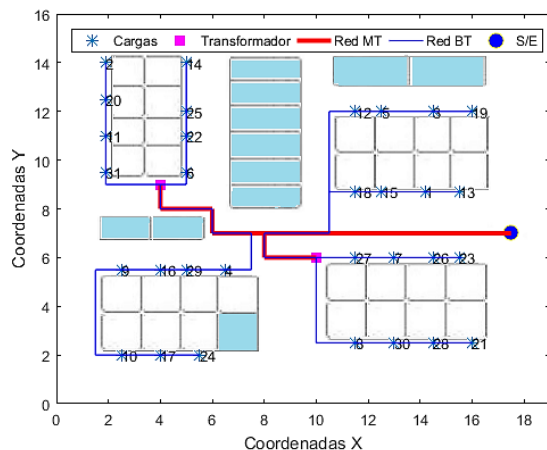


Figura 3. Despliegue óptimo de la red de distribución caso 1

La caída de tensión de cada transformador se presenta en la Tabla 2, además se detalla el resultado de la función objetivo que es reducir los costos totales de implementación de la red, por lo tanto, se comprueba que el método propuesto cumple con el objetivo de reducir costos y pérdidas en el sistema de distribución.

Tabla 2. Resultados de la Optimización de la red de distribución

Costo Total (\$)	13678.0594
Caída de tensión en el transformador 1 (%)	0.91821848
Caída de tensión en el transformador 2 (%)	0.99918709

Para la inclusión de generación distribuida se toma en cuenta las caídas de tensión en cada transformador.

Como se mencionó, la GD con generación fotovoltaica puede representar a un solo panel o a su vez a una mini central dependiendo de la capacidad que se requiera o que se disponga, la generación fotovoltaica por sus características aporta a la red y a cada transformador una compensación de potencia activa al igual que en el perfil de tensión, por lo tanto, mediante los resultados del despliegue propuesto se presenta que la GD podría incluirse en el lado de baja tensión en el circuito derivado del transformador 2 debido a que, si aumentan las cargas o usuarios para el transformador propuesto podría presentarse inconvenientes como el incremento de la caída de voltaje o pérdidas de potencia en dicho circuito, por ello es importante considerar la colocación de paneles fotovoltaicos en la red propuesta como se demuestra en la Figura 4.

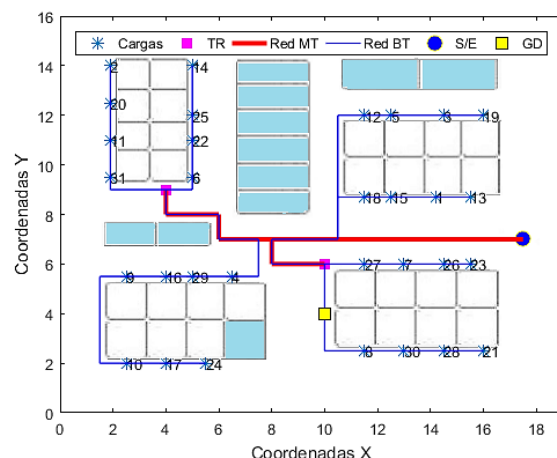


Figura 4. Despliegue óptimo de la red de distribución con GD caso 1

Para comprobar la efectividad del método se compara con un segundo escenario con incremento de usuarios manteniendo las características de transformadores y cargas. Se presenta un total de 48 usuarios, los cálculos de capacidad del transformador se mantienen para fines explicativos, en la Figura 5 se presenta que al ser mayor el número de usuarios aumenta la cantidad de transformadores.

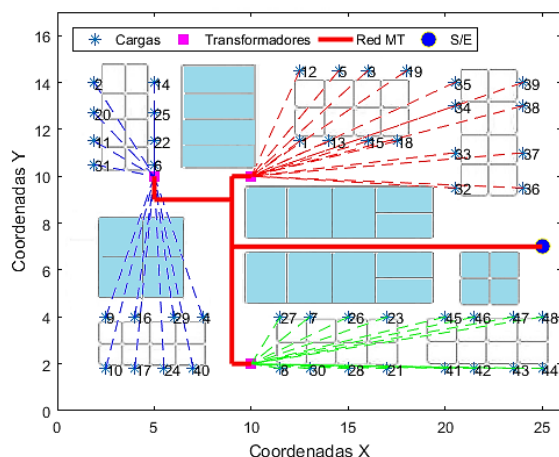


Figura 5. Despliegue de red de MT y distribución de cargas en transformadores caso 2

La Figura 5 presenta la repartición de cargas para cada transformador, se considera que cada transformador acepta 16 usuarios repartidos en el plano X y Y.

Al igual que el caso anterior no se consideran para el cálculo las viviendas existentes. En la Tabla 3 se muestra la selección de conexiones óptimas en la red.

Tabla 3. Líneas seleccionadas mediante optimización caso 2

Línea	Carga	Transformador	Long(m)	Caída de Tensión(%)
L1	31	1	8.6	0.0741
L5	11	1	6	0.0517
L9	20	1	6.2	0.0534
L13	2	1	6.3	0.0543
L17	6	1	5.5	0.0474
L21	22	1	6	0.0517
L25	25	1	6.2	0.0534
L29	14	1	6.3	0.0543
L33	9	1	15.5	0.1335
L37	16	1	6.5	0.0560
L41	29	1	7	0.0603
L45	4	1	6.5	0.0560
L49	10	1	8.2	0.0706
L53	17	1	6.5	0.0560
L57	24	1	6.5	0.0560
L61	40	1	6.5	0.0560
L65	12	2	12	0.1034
L69	5	2	7	0.0603
L73	3	2	6.5	0.0560
L77	19	2	7	0.0603
L81	1	2	6	0.0517

L85	13	2	6.5	0.0560
L89	15	2	7	0.0603
L93	18	2	6.5	0.0560
L97	33	2	15	0.1292
L101	34	2	7	0.0603
L105	35	2	6	0.0517
L109	32	2	5.5	0.0474
L113	36	2	10.1	0.0870
L117	37	2	6.5	0.0560
L121	38	2	7	0.0603
L125	39	2	6	0.0517
L129	27	3	8.5	0.0732
L133	7	3	6.5	0.0560
L137	26	3	7	0.0603
L141	23	3	7	0.0603
L145	45	3	8	0.0689
L149	46	3	6.5	0.0560
L153	47	3	7	0.0603
L157	48	3	6.5	0.0560
L161	8	3	6.7	0.0577
L165	30	3	6.5	0.0560
L169	28	3	7	0.0603
L173	21	3	7	0.0603
L177	41	3	8	0.0689
L181	42	3	6.5	0.0560
L185	43	3	7	0.0603
L189	44	3	6.5	0.0560

El algoritmo presenta resultados óptimos para el despliegue de la red, como se presenta en la Figura 6. Además, en la Tabla 4 se muestran los valores de caídas de tensión para cada transformador obtenidos mediante la optimización de la red.

Tabla 4. Resultado de la Optimización caso 2

Costo Total (\$)	21389.6346
Caída de tensión en el transformador 1 (%)	0.98454383
Caída de tensión en el transformador 2 (%)	1.04742371
Caída de tensión en el transformador 3 (%)	0.9664551

Mediante los resultados obtenidos se determina la ubicación de GD en la red, esta se debe incluir en el circuito conectado al transformador 2, ya que presenta mayor

caída de tensión como se muestra en la Figura 6.

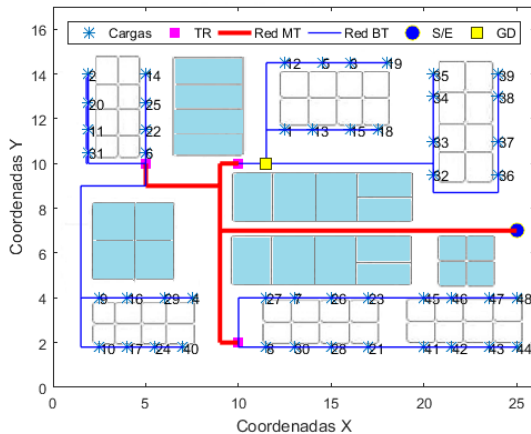


Figura 6. Despliegue óptimo de la red de distribución con GD caso 2

Cada caso presenta la inclusión de generación distribuida fotovoltaica para reducir la caída de tensión en la red y minimizar pérdidas de potencia.

En la Figura 7 se presenta la mejora que aporta en la red de distribución la inclusión de GD, indicando que las caídas de tensión disminuyen.

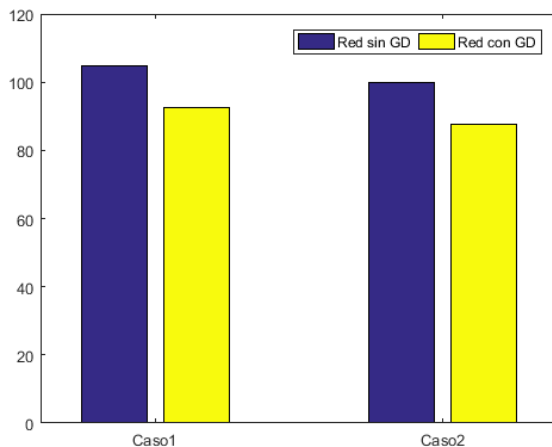


Figura 7. Caídas de tensión con GD y sin GD

La Figura 7 presenta la caída de tensión con mayor aumento en la red de distribución para cada caso expuesto, se plantea que la GD con energía fotovoltaica se incluye en estos circuitos de cada escenario para mejorar el perfil de voltaje y minimizar pérdidas.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Se ha desarrollado un método que permite realizar el óptimo despliegue de una red de distribución teniendo en cuenta el mínimo costo de la implementación del cableado de la red, además de la colocación estratégica de generación distribuida logrando una compensación de potencia, basado técnicas de optimización en conjunto de K-Medoids con Steiner tree los cuales encontraron una solución óptima y rectilínea dentro de la red propuesta en distribución simulando así barrios en el sistema.

El modelo que se ha planteado, ayuda a proyectar el despliegue óptimo de una red, debido a que el enrutamiento del sistema se realiza tradicionalmente por la experiencia de los ingenieros en el departamento de distribución.

Los resultados obtenidos por el modelo permiten establecer posibles iniciativas de despliegue y enrutamiento de redes de distribución con GD contemplando la capacidad máxima de cada transformador. Por ello, el modelo minimiza tiempos en el diseño y planeación en el despliegue de redes representadas en el circuito tipo de la IEEE donde se obtiene el mejor enrutamiento en la red.

Entonces, el método óptimo de planeación presentado puede ser una herramienta útil en la implementación del despliegue óptimo con generación fotovoltaica.

6. Trabajos Futuros

El presente artículo da extensión a futuras investigaciones tanto en el despliegue de redes de distribución como en la inclusión de generación distribuida, en sistemas con flujos bidireccionales donde se podría realizar aportaciones importantes.

7. Referencias

- [1] K. Dharageshwari and C. Nayanatara, "Multiobjective optimal placement of multiple distributed generations in IEEE 33 bus radial system using simulated annealing," *IEEE Int. Conf. Circuit, Power Comput. Technol. ICCPCT 2015*, no. 2014, 2015.
- [2] S. Angalaeswari and K. Jamuna, "Optimal placement and sizing of real power supporting DG in radial distribution networks," *2015 IEEE Int. WIE Conf. Electr. Comput. Eng. WIECON-ECE 2015*, pp. 342–345, 2016.
- [3] P. Prakash and D. K. Khatod, "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 111–130, 2016.
- [4] T. T. Nguyen, A. V. Truong, and T. A. Phung, "A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 801–815, 2016.
- [5] 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.
- [6] H. Souifi, O. Kahouli, and H. Hadj, "Optimal Power Distribution System Reconfiguration using Genetic Algorithm," in *16th international conference on Sciences and Techniques*, 2015, pp. 521–526.
- [7] J. Fletcher, T. Fernando, H. Iu, M. Reynolds, and S. Fani, "A case study on optimizing an electrical distribution network using a genetic algorithm," *2015 IEEE 24th Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 20–25, 2015.
- [8] H. Li, W. Mao, A. Zhang, and C. Li, "An improved distribution network reconfiguration method based on minimum spanning tree algorithm and heuristic rules," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 466–473, 2016.
- [9] M. Mosbah, S. Arif, R. D. Mohammedi, and A. Hellal, "Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm," *2017 5th Int. Conf. Electr. Eng. - Boumerdes*, pp. 1–6, 2017.
- [10] C. Lin, G. Wu, and L. Zhang, "Optimal Planning of Distributed Generation Allocation and Capacity for Loss Reduction," *Energy Internet Energy Syst. Integr. (EI2), 2017 IEEE Conf.*, p. 5, 2017.
- [11] C. Nayanatara, J. Baskaran, and D. P. Kothari, "Hybrid optimization implemented for distributed generation parameters in a power system network," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 690–699, 2016.
- [12] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 1311–1324, 2017.
- [13] A. M. Abd-El-Motaleb and S. K. Bekdach, "Optimal sizing of distributed generation considering uncertainties in a hybrid power system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 179–188, 2016.
- [14] U. Sultana, A. B. Khairuddin, M. M. Aman, A. S. Mokhtar, and N. Zareen, "A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage

- stability enhancement of distribution system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 363–378, 2016.
- [15] P. Kayal and C. K. Chanda, “Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 173–186, 2015.
- [16] P. Kayal and C. K. Chanda, “Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 795–809, 2013.
- [17] M. H. Athari, Z. Wang, and S. H. Eylas, “Time-series analysis of photovoltaic distributed generation impacts on a local distributed network,” *2017 IEEE Manchester PowerTech*, no. April, pp. 1–6, 2017.
- [18] V. Sharma, M. Fatima, A. Prakash, E. Engineering, and U. Pradesh, “Performance Analysis of Grid Connected and Islanded mode Photovoltaic System,” pp. 145–149, 2017.
- [19] M. J. Reno, K. Coogan, S. Grijalva, R. J. Broderick, and J. E. Quiroz, “PV interconnection risk analysis through distribution system impact signatures and feeder zones,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014–Octob, no. October, pp. 4–8, 2014.
- [20] E. L. Ratnam, S. R. Weller, and C. M. Kellett, “An optimization-based approach to scheduling residential battery storage with solar PV: Assessing customer benefit,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 123–134, 2015.
- [21] A. Nagarajan and R. Ayyanar, “Application of Minimum Spanning Tree Algorithm for Network Reduction of Distribution Systems,” 2014.
- [22] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, “Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, pp. 226–235, 2016.
- [23] M. Kefayat, A. Lashkar Ara, and S. A. Nabavi Niaki, “A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 92, pp. 149–161, 2015.
- [24] M. Pesaran H.A, P. D. Huy, and V. K. Ramachandaramurthy, “A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. September 2015, pp. 293–312, 2017.
- [25] S. R. Gampa and D. Das, “Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 66, pp. 25–40, 2015.
- [26] M. Emmanuel and R. Rayudu, “The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using P-Q and P-V models,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 91, pp. 20–33, 2017.
- [27] J. Ye, J. Xue, Q. Tao, and B. Yang, “Dispatch Strategy for Energy Storage Station in Distribution Network with High Penetration Photovoltaic Generation,” pp. 1–6, 2016.
- [28] B. Poornazaryan, P. Karimyan, G. B. Gharehpetian, and M. Abedi, “Optimal allocation and sizing of DG units considering voltage

- stability, losses and load variations,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 79, pp. 42–52, 2016.
- [29] O. Penangsang, D. F. U. Putra, and T. Kurniawan, “Optimal placement and sizing of distributed generation in radial distribution system using K-means clustering method,” *2017 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl.*, pp. 98–103, 2017.
- [30] X. Han, J. Liu, D. Liu, Q. Liao, J. Hu, and Y. Yang, “Distribution network planning study with distributed generation based on Steiner tree model,” *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, vol. 1, pp. 1–5, 2014.
- [31] 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.
- [32] E. G. Carrano, C. G. Tarôco, O. M. Neto, and R. H. C. Takahashi, “A multiobjective hybrid evolutionary algorithm for robust design of distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 645–656, 2014.
- [33] L. Ortiz-Matos, A. Aguila-Tellez, R. C. Hincapié-Reyes, and J. W. González-Sánchez, “Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, 2017.
- [34] A. Águila Tellez, D. C. Carrión, and L. Ortiz Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [35] M. J. Afzal, A. Arshad, S. Ahmed, S. Bin Tariq, and S. A. A. Kazmi, “A review of DGs and FACTS in power distribution network: Methodologies and objectives,” in *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, 2018, pp. 1–7.
- [36] M. Emmanuel, S. Member, R. Rayudu, S. Member, and I. Welch, “Grid incremental capacity evaluation with an optimally deployed photovoltaic system in distribution network,” 2017.
- [37] F. Scarlatache, G. Grigora, G. Chicco, and G. Câr, “Using k-Means Clustering Method in Determination of the Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Electrical Distribution Systems,” *IEEE Optim. Electr. Electron. Equip. (OPTIM)*, *2012 13th Int. Conf.*, pp. 953–958, 2012.
- [38] D. P. Kaundinya, P. Balachandra, N. H. Ravindranath, and V. Ashok, “A GIS (geographical information system)-based spatial data mining approach for optimal location and capacity planning of distributed biomass power generation facilities: A case study of Tumkur district, India,” *Energy*, vol. 52, pp. 77–88, 2013.
- [39] D. Carrión, E. Inga, J. W. Gonzalez, and R. Hincapié, “Optimal Geographical Placement of Phasor Measurement Units based on Clustering Techniques,” *51st Int. Univ. Power Eng. Conf.*, p. 6, 2016.
- [40] Y. Wang, H. Wang, and G. Kong, “An Estimation of Distribution Algorithm for Steiner Tree Problem,” *2013 IEEE 10th Int. Conf. High Perform. Comput. Commun. 2013 IEEE Int. Conf. Embed. Ubiquitous Comput.*, pp. 1687–1692, 2013.
- [41] X. Nie, S. Zhu, H. Wang, and F. Huang, “A new method of rural road network layout designing in

- the county: Generating algorithm of rectilinear steiner tree,” *2010 Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom. ICICTA 2010*, vol. 1, pp. 37–41, 2010.
- [42] D. Carrión, Garcia E Marcelo, J. W. González, and G. J. López, “Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución,” no. January, pp. 90–96, 2017.
- [43] M. Sosa, “Guía para diseño de redes para distribución,” Quito, 2012.

7.1 Estado del Arte:

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA									
				Generación distribuida	Análisis Generación Fotovoltaica	Ubicación Óptima DG con múltiples generaciones	Algoritmos de optimización	Redes de distribución óptimas	Ubicación óptima DE DG	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	Impactos de energía solar en red de distribución	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA	Evaluación del modelo solar	harmónicos en la red	Magnitud de Voltaje en cada bus	Flujo óptimo de Potencia	Topología de la Red	Potencia DG	Capacidad de la Línea	Micro redes	MINLP	Ubicación óptima de DG	FOURIER, WAVELET, ALGORITMOS	Optimización de la red	óptima selección de recursos de energía renovable	Asignación óptima de generación fotovoltaica y niveles de penetración	Rendimiento de la Red	MST, Heurísticas
1	2017	Time-Series Analysis of Photovoltaic Distributed Generation Impacts on a Local Distributed Network	1	☒	☒								☒										☒		☒				☒
2	2016	Dispatch Strategy for Energy Storage Station in Distribution Network with High Penetration Photovoltaic Generation	1	☒	☒									☒											☒	☒			
3	2017	Performance Analysis of Grid Connected and Islanded mode Photovoltaic System	0	☒	☒							☒							☒		☒				☒	☒			
4	2017	Optimal Planning of Distributed Generation Allocation and Capacity for Loss Reduction	0	☒					☒	☒				☒	☒		☒	☒			☒		☒			☒			☒
5	2015	Optimal sizing of distributed generation considering uncertainties in a hybrid power system	9	☒		☒						☒		☒	☒						☒		☒	☒			☒		☒
6	2015	Hybrid optimization implemented for distributed generation parameters in a power system network	5	☒					☒	☒				☒	☒						☒		☒	☒			☒		☒
7	2016	Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations	12	☒					☒	☒				☒	☒						☒		☒				☒		☒
8	2015	Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks	28	☒		☒				☒				☒	☒						☒		☒	☒					☒
9	2017	The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using P-Q and P-V models	3	☒	☒														☒						☒	☒			
10	2013	Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement	123	☒		☒				☒				☒	☒						☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒
11	2015	Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network	27	☒		☒						☒		☒	☒						☒			☒		☒			

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Análisis Generación Fotovoltaica	Ubicación Óptima DG con múltiples generaciones	Algoritmos de optimización	Redes de distribución óptimas	Ubicación óptima DE DG	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	Impactos de energía solar en red de distribución	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA	Evaluación del modelo solar	harmónicos en la red	Magnitud de Voltaje en cada bus	Flujo óptimo de Potencia	Topología de la Red	Potencia DG	Capacidad de la Línea	Micro redes	MINLP	Ubicación óptima de DG	FOURIER, WAVELET, ALGORITMOS	Optimización de la red	óptima selección de recursos de energía renovable	Asignación óptima de generación fotovoltaica y niveles de penetración	Rendimiento de la Red	MST, Heurísticas	Óptima ubicación y dimensionamiento de DG
12	2016	A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage stability enhancement of distribution system	20	☒					☒	☒						☒	☒		☒				☒		☒			☒		☒
13	2017	A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms	17	☒					☒	☒		☒	☒			☒	☒		☒				☒		☒			☒		☒
14	2016	Optimal allocation and sizing of DG units considering voltage stability, losses and load variations	29	☒					☒	☒			☒				☒	☒					☒		☒			☒		☒
15	2015	Multiobjective Optimal Placement of Multiple Distributed Generations in IEEE 33 Bus Radial System Using Simulated Annealing	7	☒					☒	☒		☒					☒						☒		☒			☒		☒
16	2015	A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources	75	☒	☒				☒	☒		☒	☒			☒	☒	☒	☒				☒		☒	☒				☒
17	2016	Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review	50	☒					☒	☒		☒	☒			☒	☒		☒				☒		☒			☒		☒
18	2015	Optimal Placement and Sizing of Real Power Supporting DG in Radial Distribution Networks	4	☒					☒	☒						☒	☒		☒				☒		☒			☒		☒
19	2014	PV Interconnection Risk Analysis through Distribution System Impact Signatures and Feeder Zones	17	☒	☒						☒			☒				☒								☒	☒			
20	2015	An optimization-based approach to scheduling residential battery storage with solar PV: Assessing customer benefit	56		☒				☒	☒	☒	☒					☒	☒							☒		☒	☒		
21	2016	A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network	34	☒					☒	☒			☒					☒	☒				☒		☒			☒		☒
22	2015	Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load	41	☒	☒				☒	☒	☒						☒	☒	☒				☒		☒	☒		☒		☒

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Análisis Generación Fotovoltaica	Ubicación Óptima DG con múltiples generaciones	Algoritmos de optimización	Redes de distribución óptimas	Ubicación óptima DE DG	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	Impactos de energía solar en red de distribución	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA	Evaluación del modelo solar	harmónicos en la red	Magritud de Voltaje en cada bus	Flujo óptimo de Potencia	Topología de la Red	Potencia DG	Capacidad de la Línea	Micro redes	MINLP	Ubicación óptima de DG	FOURIER, WAVELET, ALGORITMOS	Optimización de la red	óptima selección de recursos de energía renovable	Asignación óptima de generación fotovoltaica y niveles de penetración	Rendimiento de la Red	MST, Heurísticas	Óptima ubicación y dimensionamiento de DG			
23	2016	Planning and Project of Medium Voltage Electric Power Distribution Systems	2					☒				☒					☒	☒							☒								
24	2016	Optimal power distribution system reconfiguration using genetic algorithm	3					☒		☒		☒						☒							☒				☒				
25	2015	A case study on optimizing an electrical distribution network using a genetic algorithm	3					☒		☒		☒						☒							☒				☒				
26	2016	An improved distribution network reconfiguration method based on minimum spanning tree algorithm and heuristic rules	8					☒		☒		☒						☒							☒				☒				
27	2017	Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm	0					☒				☒						☒							☒				☒				
28	2014	Application of Minimum Spanning Tree Algorithm for Network Reduction of Distribution Systems	7	☒	☒			☒		☒								☒							☒	☒			☒				
29	2014	Distribution network planning study with distributed generation based on Steiner tree model	0	☒		☒		☒	☒			☒				☒		☒	☒				☒							☒			
30	2017	Optimal placement and sizing of distributed generation in radial distribution system using K-means clustering method	0	☒		☒		☒	☒	☒						☒		☒					☒							☒	☒		
31	2012	Using k-Means Clustering Method in Determination of the Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Electrical Distribution Systems	11	☒		☒		☒	☒	☒					☒		☒	☒					☒							☒	☒		
32	2014	A multiobjective hybrid evolutionary algorithm for robust design of distribution networks	9					☒		☒		☒				☒		☒							☒				☒	☒			
33	2007	Optimal Distribution System Horizon Planning–Part I: Formulation	101					☒				☒				☒	☒	☒							☒				☒				
34	2017	Grid incremental capacity evaluation with an optimally deployed photovoltaic system in distribution network	0	☒	☒			☒		☒	☒		☒				☒	☒	☒						☒		☒		☒				

ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA									
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Análisis Generación Fotovoltaica	Ubicación Óptima DG con múltiples generaciones	Algoritmos de optimización	Redes de distribución óptimas	Ubicación óptima DE DG	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	Impactos de energía solar en red de distribución	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA	Evaluación del modelo solar	harmónicos en la red	Magnitud de Voltaje en cada bus	Flujo óptimo de Potencia	Topología de la Red	Potencia DG	Capacidad de la Línea	Micro redes	MINLP	Ubicación óptima de DG	FOURIER, WAVELET, ALGORITMOS	Optimización de la red	óptima selección de recursos de energía renovable	Asignación óptima de generación fotovoltaica y niveles de penetración	Rendimiento de la Red	MST, Heurísticas	Óptima ubicación y dimensionamiento de DG
35	2018	A Review of DGs and FACTS in Power Distribution Network: Methodologies and Objectives	0	☒				☒	☒			☒			☒	☒							☒	☒				☒	☒	
36	2013	An Estimation of Distribution Algorithm for Steiner Tree Problem	0			☒					☒					☒							☒						☒	
37	2017	Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución	2				☒				☒																			
38	2010	A New Method of Rural Road Network Layout Designing in the County: Generating Algorithm of Rectilinear Steiner Tree	1			☒					☒												☒						☒	
39	2013	A GIS (geographical information system)-based spatial data mining approach for optimal location and capacity planning of distributed biomass power generation facilities: A case study of Tumkur district, India	29	☒				☒	☒		☒					☒							☒				☒	☒		
40	2016	Optimal Geographical Placement of Phasor Measurement Units based on Clustering Techniques	3				☒				☒					☒							☒					☒		
41	2015	Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems	22				☒		☒		☒				☒									☒			☒			
42	2017	Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method	3				☒		☒		☒				☒	☒		☒					☒	☒				☒		
43	2014	Guía para diseño de redes para distribución					☒																	☒						
			CANTIDAD:	28	8	9	2	16	17	27	5	23	8	2	20	20	24	11	2	2	1	18	7	30	8	8	26	15	18	

7.2 Resumen de indicadores

