

**DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN
REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN
REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS**

**AUTOR:
PABLO ANDRÉS ONOFRE MUÑOZ**

**TUTOR:
IVÁN PATRICIO GALÁRRAGA MONTALVO**

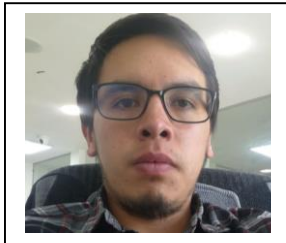
Quito, enero 2020

Pablo Andrés Onofre Muñoz

**DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA
EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE
GRAFOS**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Pablo Andrés Onofre Muñoz (Y'1993-M'01).
Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad
Politécnica Salesiana sede Quito. Áreas de interés:
Generación distribuida, diseño de sistemas de
distribución, redes inteligentes, energía renovable.
ponofre@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Iván Patricio Galárraga Montalvo (Y'1987 –SM06).
Se graduó en Ingeniería Electrónica en la Universidad
San Francisco de Quito y de Master en ciencia en
Ingeniería de Distribución de Energía. Área de interés:
diseño, sistemas de redes de distribución. Actualmente
es miembro del Girei (Grupo de Investigación en Redes
Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).
imontalvo@ups.edu.ec

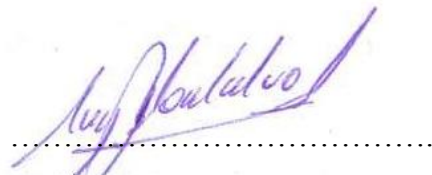
Todos los derechos reservados:

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.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Iván Patricio Galárraga Montalvo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación (*DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS*) realizado por (Pablo Andrés Onofre Muñoz), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, enero del 2020



Iván Patricio Montalvo Galárraga

Cédula de identidad: 1716480916

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Pablo Andrés Onofre Muñoz con documento de identificación N° 0104905229, 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: “DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS”, 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo Onofre Muñoz', is written over a horizontal dotted line.

Nombre: Pablo Onofre

Cédula: 0104905229

Fecha: enero del 2020

1. *INDICE GENERAL*

1	Introducción	2
2	Marco teórico	4
2.1	Implementación de GD en sistemas eléctricos.....	4
2.2	Dimensionamiento de sistemas de GD	5
2.3	GD integrada al sistema eléctrico	5
2.4	Teoría de grafos en redes de distribución	7
2.5	Resiliencia en sistemas de distribución.....	8
3	Caso de estudio	9
4	Análisis de resultados	14
5	Conclusiones	16
6	Trabajos futuros	17
7	Referencias.....	17
8	Estado del arte.....	21

2. *ÍNDICE DE FIGURAS*

Figura 1.	Sistema de distribución con unidades de GD	4
Figura 2.	Radialidad en sistema eléctrico de distribución.....	5
Figura 3.	Ejemplo del MST.....	7
Figura 4.	Usuarios consumidores georreferenciados	12
Figura 5.	Aplicación del algoritmo de Prim.....	13
Figura 6.	Conexión de usuarios finales	14
Figura 7.	Detalle de conexión de T1 y T2.....	14
Figura 8.	Perfiles de voltaje sin GD	15
Figura 9.	Perfiles de voltaje con GD.....	16
Figura 10.	Indicadores de Estado del Arte - Temática.....	25
Figura 11.	Indicadores de Estado del Arte – Formulación del problema.....	25
Figura 12.	Perfiles de voltaje con GD.....	25

3. *ÍNDICE DE TABLAS*

Tabla 1.	Ventajas y desventajas de la entrada de GD en los sistemas de potencia....	5
Tabla 2.	Pseudocódigo del algoritmo de Prim	10
Tabla 3.	Voltaje en (p.u) del sistema eléctrico de distribución sin GD	15
Tabla 4.	Voltaje en (p.u) del sistema de distribución con GD	16
Tabla 5.	Indicadores de Estado del Arte- Temática. ¡Error! Marcador no definido.	

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCION BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS

Resumen

El objetivo principal del presente trabajo es encontrar una solución óptima para el dimensionamiento de generación distribuida (GD) en redes de distribución usando la teoría de grafos. Para ello se utiliza el algoritmo del árbol mínimo de expansión (MST), dentro del MST existen dos tipos de algoritmos altamente usados en sistemas eléctricos de distribución, los cuales son: Prim y Dijkstra. El algoritmo de Prim resuelve el árbol mínimo de expansión, en este caso el enrutamiento más corto entre nodos de distribución, mientras que, el algoritmo de Dijkstra encuentra la conexión más cercana de varios elementos que se dirigen a un solo objetivo. De esta manera se selecciona un mapa el cual contenga un escenario típico de viviendas urbanas, donde es posible diseñar un sistema eléctrico de distribución, en el cual se ubican georeferenciadamente los siguientes elementos: transformadores de distribución, unidades de GD y usuarios finales. El algoritmo de Prim obtiene el enrutamiento óptimo de la red de media tensión de acuerdo a la ubicación de los usuarios finales, y el algoritmo de Dijkstra obtiene la conexión de baja tensión entre los transformadores de distribución y los usuarios finales. Las unidades de GD van acopladas en los nodos de distribución de bajo voltaje, mejorando los perfiles de voltaje, reduciendo las pérdidas eléctricas generadas por la distancia existente de los conductores.

Palabras Clave: Teoría de grafos, Redes de distribución, Optimización, Generación Distribuida, Resiliencia.

Abstract

The main objective of this article is to show a solution for an optimal sizing of distributed generation (GD) in distribution networks using graph theory. For this purpose it uses the Minimal Spanning Tree (MST) algorithm, within the MST exist two types of algorithms highly used in electric distribution systems, those are: Prim and Dijkstra. Prim's algorithm solves the minimal spanning tree, in this case the shortest path between distribution nodes, whereas that, Dijkstra's algorithm find the nearest path of several elements which conduct to a single objective. In this manner a typical urban housing scenario was selected, where is possible sizing an electric distribution system, which locates georeferenced the following elements: distributed transformers, GD units and final users. Prim's algorithm obtains the optimal route of the médium voltaje and it depends on the location of end users, and Dijkstra's algorthm obtains the low voltaje path between distributed transformers and end users. The GD units coupled with distribution low voltage node, providing to the electric distribution system, improving the voltaje profile, reducing power losses generated by the existent distance of the conductors.

Keywords: Graph theory, Distribution networks, Optimization, Distributed Generation, Reliability.

1. Introducción

En la actualidad el crecimiento de la población y la implementación de nuevas tecnologías en el uso diario doméstico, son las principales causas que generan continuamente el aumento de la demanda del consumo de energía, y con ello la insuficiencia para solventar dicha demanda; es por esta razón que se tiene la necesidad de construir nuevas fuentes de generación eléctrica [1]. Ya que las disposiciones geográficas de los recursos no renovables tales como: agua, petróleo, gas o carbón [2] no se pueden obtener cerca de los centros de consumo, es factible analizar la posibilidad de usar fuentes de generación renovables ubicadas cerca de los centros de consumo, las cuales aporten de manera positiva al funcionamiento del sistema eléctrico de distribución.

Los mercados eléctricos han ido cambiando con el paso del tiempo, ahora las grandes empresas que operan con residuos fósiles, también conocido como petróleo y sus derivados, están vendiendo sus compañías y optan por entrar al nuevo mercado de energías limpias. En varios países se ha prohibido el uso de sistemas eléctricos autónomos, ya que esto afecta directamente a la economía del país, a pesar de esto, no se puede dejar pasar que el uso de energías renovables y los sistemas de GD, son muy importante para preservar al ecosistema del planeta tierra y así mejorar la calidad de vida de la población en general.

Se conoce que en el país, el sistema de transmisión y distribución eléctrico están sufriendo un cambio importante de desarrollo, debido a las grandes centrales de generación instaladas en los últimos años y también a la implementación del uso de equipos eléctricos domésticos como: artefactos para calentamiento de agua, cocción a inducción, secadoras de ropa, aires acondicionados y nuevas tecnologías

que poco a poco se van acoplando al uso diario.

La mayoría de centrales de generación eléctrica instaladas en los últimos años son de recurso hídrico, estas son consideradas como un tipo de generación de energía limpia, una de las más importantes ventajas es que no producen el efecto de gas de invernadero; a pesar de ello, las hidroeléctricas no dejan de tener un impacto ambiental negativo, ya que alteran al ecosistema existente debido a que la temperatura, caudal y flujo del agua se ven afectados, de esta forma amenazan a la fauna, flora y por ende a las personas que habitan en los alrededores [3], además, si se añade las otras centrales de generación eléctrica con energía no renovable instaladas, el impacto ambiental negativo se vuelve cada vez más preocupante; es por esta razón que optar por el uso de GD es una buena alternativa para disminuir el impacto ambiental. Debido a este aumento de energía generada en los últimos años, tanto el sistema eléctrico de transmisión como el de distribución deben ser repotenciados, expandidos y mejorados su estructura, con vista de desarrollo a ser redes inteligentes que trabajen conjuntamente con unidades de GD.

En los últimos años, se han llevado a cabo varios estudios acerca de la planeación de redes eléctricas de distribución. Según los autores Zhao y Mi señalan que este problema empezó a crecer a partir del año 1960, y dan un resumen muy concreto de los modelos matemáticos y algoritmos de optimización de redes de distribución existentes, a los cuales los simplifican en dos métodos básicos: método de agotamiento y el método de encuadración y ramificación [4]. Por otro lado, los autores Swarnkar, Gupta y Niazi hacen estudios de varios tipos de algoritmos para la reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución y sus aplicaciones, con

adaptación a la teoría de grafos. Estos autores señalan algoritmos como: algoritmos basados en la población, técnicas meta-heurísticas, algoritmo inmune, algoritmo evolucionario, búsqueda de tabú, optimización de enjambre de partículas, optimización de colonia de hormigas, entre otros [5]. Algunos autores locales han aportado con el análisis de expansión óptima de sistemas de transmisión mediante el uso de algoritmos como: Prim y Kruskal, otros autores han desarrollado modelos matemáticos basados en la teoría de grafos para el planeamiento de redes eléctricas de distribución, por otro lado, algunos autores han presentado un modelo matemático de optimización basado en el MST para la implementación de unidades de medición fasorial (PMU) [6][7], aportando de manera positiva al continuo estudio y análisis del uso de la teoría de grafos en sistemas eléctricos de potencia.

En este trabajo se hace el análisis del uso de algoritmos de MST, tales como: Prim y Dijkstra para desarrollar la optimización del enrutamiento de una red de medio voltaje y la conexión de los usuarios finales con los nodos de distribución de bajo voltaje, considerando las restricciones físicas existentes de acuerdo a la zona donde se requiere implementar el sistema, haciendo el enrutamiento de nodos siguiendo el camino lineal existente de las calles por donde es posible trazar una ruta de distribución, esta red puede ser tanto aérea como subterránea.

En el presente trabajo se pretende utilizar la teoría de grafos para dimensionar de manera óptima un sistema de distribución utilizando unidades de GD. Con la ayuda de los algoritmos mencionados anteriormente, se plantea analizar la óptima ubicación de fuentes renovables en un sistema de distribución eléctrico, en el cual, todos sus componentes se encuentran geo-

referenciados. Se ha escogido trabajar con el algoritmo de Prim y Dijkstra, los cuales pertenecen a la teoría de grafos. En primera instancia, se hace el uso del algoritmo del árbol mínimo de expansión (MST) [6], específicamente el algoritmo de Prim, varios autores señalan que el algoritmo de Prim es el más útil para encontrar el árbol recubridor mínimo, y aplicándolo en el campo de la electricidad, este algoritmo sirve para resolver la restauración de sistemas eléctricos minimizando la cantidad de elementos a utilizar, de esta manera, al aplicar este algoritmo se obtiene la resolución del enrutamiento lineal óptimo entre nodos de un sistema de distribución [8][9]. Posteriormente se usa el algoritmo de Dijkstra, en el cual, mediante una matriz de pesos y una restricción de distancia mínima, ayuda a resolver la conexión más cercana entre los usuarios consumidores y los nodos de bajo voltaje, en los cuales se encuentran conectados los transformadores de distribución conjuntamente con las unidades de GD.

Se propone planificar una red eléctrica de distribución tanto de medio como de bajo voltaje, conjuntamente integrada con unidades de GD, con el objetivo de minimizar las pérdidas totales del sistema, elevando los perfiles de voltaje y analizando la posibilidad de aumentar los niveles de resiliencia del sistema eléctrico, en caso de que ocurra algún desastre natural el cual tenga como resultado una falla en el sistema, o de ser el caso, esta falla puede ocurrir por otros motivos propios del sistema eléctrico, alimentando de forma parcial o total a la red de distribución solo con el uso de unidades de GD [10]. Se desarrolla un modelo matemático para que su función objetivo sea la minimización de distancia entre cada ramal de conexión [11][12].



Figura 1. Sistema de distribución con unidades de GD

2. Marco teórico

2.1 Implementación de GD en sistemas eléctricos

En la actualidad se está optando por el uso de unidades de “Generación distribuida” (GD) para la producción de energía eléctrica, estas pueden usar varios recursos ya sean renovables o no renovables. Hoy en día es más común observar pequeños generadores ubicados cerca de los centros de consumo; este tipo de generación es conocida como GD [13][2]. El avance y desarrollo de varias tecnologías se ha visto impulsado por la importancia en la reducción del consumo de los recursos no renovables principalmente del combustible fósil, para obtener un mejor aprovechamiento de los recursos renovables, como el eólico y solar [2].

La importancia de la GD empezó a destacar en varios países en los últimos años [14], ya que comenzaron a optar por la liberación de sus mercados eléctricos y adoptar nuevas políticas para incentivar a la evolución y desarrollo de nuevas tecnologías de generación. Un factor importante que ha causado mucho interés en la GD es la gran reducción del impacto negativo ambiental [15]. En la tabla 1 se describe las principales ventajas y desventajas de la generación distribuida en los sistemas de potencia [16]. Al pretender integrar unidades de GD en un sistema eléctrico de distribución, empiezan a generarse problemas de fiabilidad, calidad y estabilidad en la red por la intermitencia de las fuentes de GD, debido a que la energía fluctúa por la disponibilidad de la fuente primaria.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la entrada de GD en los sistemas de potencia

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aspecto Técnico: aumento de confiabilidad del sistema y calidad de la energía	Aspecto de Potencia y Tensión: problemas de estabilidad y seguridad, provocados por la conexión y desconexión de GD de manera aleatoria.
Aspecto Ambiental: disminución de los gases del efecto invernadero	
Aspecto Económico: disminución en los precios de electricidad.	

2.2 Dimensionamiento de sistemas de GD

En un flujo de potencia de un sistema de distribución, se debe considerar que el mismo es de naturaleza radial y que tiene una alta relación R y X [17]. Como se muestra en la figura 2.

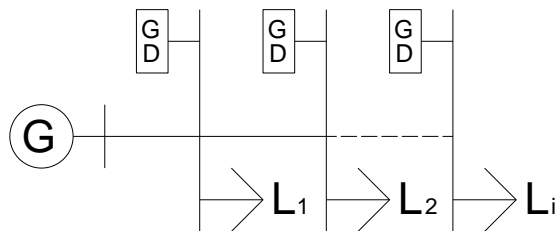


Figura 2. Radialidad en sistema eléctrico de distribución.

Para el cálculo del dimensionamiento de las unidades de GD, se considera que dichas unidades aportan al sistema eléctrico solo con potencia activa (P), de esta manera se calcula la potencia necesaria que deben tener como mínimo las unidades de GD, para esto es necesario hallar las pérdidas generadas en el sistema, de otra manera, si se desea mejorar aún más los perfiles de voltaje y dar un mejoramiento al nivel de resiliencia del sistema en general, se puede aumentar la potencia de las unidades de GD.

Las pérdidas del sistema (P_P), se calculan mediante la diferencia entre la potencia activa inyectada (P_I) y la potencia activa de la carga (P_C) [18], como se muestra en la ecuación (1):

$$P_P = P_I - P_C \quad (1)$$

Una vez encontradas las pérdidas eléctricas del sistema, se puede calcular la potencia necesaria de las unidades de GD (P_{GD}), para esto es necesario encontrar la diferencia entre la potencia de la carga (P_C) y las pérdidas del sistema (P_P), como se muestra en la ecuación (2):

$$P_P = P_C - P_{GD} \quad (2)$$

Para dar más niveles de confiabilidad y resiliencia al sistema, la potencia de las unidades de GD puede aumentar, con el fin de que abastezca parcial o totalmente a la red.

2.3 GD integrada al sistema eléctrico

Al analizar la integración de unidades de GD en una red de distribución eléctrica, el escenario del sistema eléctrico de distribución tradicional se vuelve complejo. Existen varios cambios importantes dentro de la estructura de la red del sistema que se tienen que tomar en cuenta, es muy importante mencionar también que para añadir GD, en este caso de un sistema fotovoltaico, es necesario tener un espacio físico disponible en donde se tenga acceso para instalar las unidades de GD, debido a esto, la posibilidad de utilizar dicho sistema se reduce en cierta cantidad dependiendo donde se lo requiera, por ejemplo, en áreas urbanas la mayoría de zonas están copadas de viviendas reduciendo el espacio de aéreas verdes disponibles, por este motivo, actualmente las unidades de GD se están implementando en viviendas de tipo

verticales, en la mayoría de casos se instalan dichos sistemas en terrazas y/o aprovechándolos como ventanas [19].

En la actualidad, la eficiencia de un sistema fotovoltaico aún no ha sido desarrollado para tener un nivel aceptable que logre abastecer completamente a las construcciones de tipo verticales, ya que se necesita una gran cantidad de potencia debido a que habitan muchos usuarios en edificios residenciales; considerando también que la implementación de dicho sistema en las montañas tiene un gran impacto ambiental y visual, por lo que generalmente se instalan en la red de bajo voltaje [20].

Esto representa un reto con un alto nivel de dificultad para planificar nuevos sistemas de distribución, ya que los sistemas eléctricos de distribución actualmente instalados han sido dimensionados para trabajar de forma radial y con un flujo unidireccional, que va desde: las unidades de generación de electricidad, líneas de transmisión, líneas de distribución hasta llegar a las cargas finales de los usuarios consumidores, es decir, desde los voltajes más altos hasta los voltajes más bajos; por este motivo se debe analizar con mayor detalle los nuevos escenarios de sistemas eléctricos de distribución, una característica importante es que dichos sistemas deben operar con un flujo bidireccional.

Si se añade unidades de GD cerca de los centros de consumo, dichas unidades inyectan una potencia extra al sistema eléctrico de distribución, reduciendo así, la necesidad de aumentar el voltaje en los nodos del sistema con el fin de compensar las pérdidas existentes a lo largo de las líneas de transmisión y distribución [21][22].

El sistema eléctrico de distribución tradicional, está diseñado para balancear ecuaciones de nodos tipo PQ, las cuales se concentran en mantener un nivel aceptable de potencia activa y reactiva, por otro lado, en un sistema con unidades de GD, se necesita equilibrar ecuaciones de nodos tipo PV, estos dos análisis son completamente distintos, ya que al balancear ecuaciones de nodos tipo PV, provoca el aumento de niveles de potencia activa y magnitudes de voltaje; recalando que para lograr un nivel aceptable de confiabilidad en la implementación de dichos sistemas, es completamente necesario el análisis anteriormente mencionado.[23]

Al analizar a larga escala la implementación de varias fuentes de GD en el sistema eléctrico de distribución, tanto la confiabilidad, resiliencia y estabilidad del sistema eléctrico resultan favorecidas, específicamente en la eficiencia del sistema, ya que depende considerablemente de las propiedades en la estructura de la red, debido a que dicho sistema debe poseer elementos eléctricos de gran importancia como son: relés, re-conectores, seccionadores, y más elementos de maniobra que resultan ser indispensables para que la red tenga los requisitos suficientes y pueda operar autónomamente; por esta razón los nuevos sistemas planificados a largo plazo, tienen la necesidad de cambiar la estructura tradicional de los sistemas eléctricos de distribución [24][25].

Uno de los mayores problemas al integrar a la red de distribución eléctrica unidades de GD de tipo fotovoltaicas, es que estas no tienen un nivel de potencia estable en la salida de los paneles fotovoltaicos, debido a la variación de la irradiación que depende

directamente del clima, por este motivo tiene problemas como: baja calidad de potencia estable, variación de voltaje, estrés térmico y la posibilidad de que exista un flujo de potencia inverso alterando el sistema muy desfavorablemente; es por esta razón que muchos autores enfatizan que el uso de sistemas de GD deben integrarse siempre acompañados de redes inteligentes, es decir que, además del uso de paneles fotovoltaicos, es necesario añadir conjuntamente un sistema eficiente e inteligente compuesto por baterías de almacenamiento de energía y el uso de compensadores estáticos distribuidos, con la ayuda de los elementos mencionados anteriormente, los niveles confiabilidad de la red aumentarán considerablemente [26].

2.4 Teoría de grafos en redes de distribución

Matemáticamente la teoría de grafos se establece como un conjunto de nodos, los cuales están conectados entre ellos mediante enlaces. Se define a V_N para representar a los conjuntos de nodos, $E_{i,j}$ para los conjuntos de enlaces, este consta de pares de vértices, i es un vértice de salida y j un vértice de llegada. De tal manera se define a la matriz $G(V, E)$ para representar una topología de red. Se establece a $V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ para definir al conjunto de vértices del sistema. Se establece a $E = \{E_1, E_2, \dots, E_{N-1}\}$ para definir el conjunto de aristas del sistema. De esta forma dependiendo del valor entre aristas i y j se asigna el valor de 0 o 1, como se muestra en (3):

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } (V_i, V_j) \in E \\ 0, & \text{si } (V_i, V_j) \notin E \end{cases} \quad (3)$$

Con estos valores analizados, se encuentra la matriz G de conexiones entre nodos y ramales, hasta completar el árbol mínimo de

expansión, las líneas azules representan el camino más corto para resolver el MST, como se muestra en la figura 3.

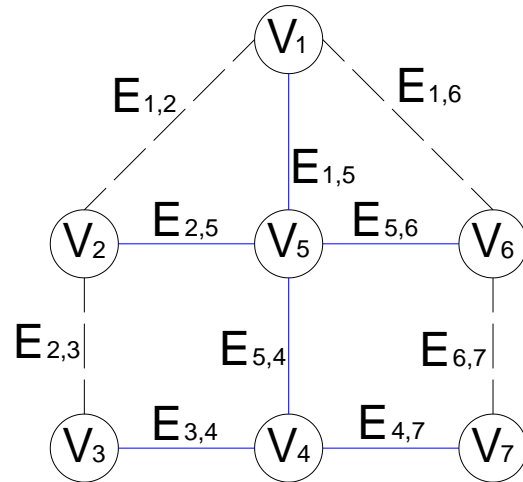


Figura 3. Ejemplo del MST.

La teoría de grafos es una herramienta que sirve para resolver gráficamente una ruta óptima de conexión entre ramales, aplicado al campo de la electricidad, la teoría de grafos ayuda a encontrar el camino más corto entre dos nodos eléctricos, logrando así tener una optimización del sistema [27]; esta teoría propone que en un sistema eléctrico en el cual existan varios nodos conectados por algunos ramales, en este caso, puede ser un sistema de distribución o transmisión eléctrico, si a dichos sistemas se los analiza gráficamente, se logra describir una estructura topológica de un moderno sistema eléctrico de potencia [28].

Dentro de la teoría de grafos existe el algoritmo del árbol mínimo de expansión (MST), este ha sido analizado por varios autores dentro del campo eléctrico, los cuales señalan que es útil para analizar de forma radial y eficiente un sistema eléctrico de distribución [29].

El algoritmo del MST, es un algoritmo determinístico, lo cual significa que al analizar bajo las mismas condiciones el mismo sistema eléctrico, el resultado final será igual para las múltiples corridas del programa, la idea principal de utilizar teoría

de grafos es minimizar el trayecto de conexión entre nodos hasta llegar a resolver una nueva configuración del sistema, logrando una optimización de recursos, añadiendo a esto una optimización en la implementación de unidades de GD, con lo mencionado anteriormente se tiene la posibilidad de reducir las pérdidas eléctricas y mejorar la confiabilidad y resiliencia del sistema eléctrico [30][31].

Al algoritmo del MST se lo puede describir de la siguiente manera: dado un grafo que tenga múltiples posibilidades de conexiones de ramales entre nodos, el algoritmo del MST es un sub-grafo que conecta en forma de árbol a todos los nodos de manera óptima y eficiente, considerando la mejor opción de conexión de cada ramal [9]. Al pretender resolver un sistema de distribución eléctrico con teoría de grafos, es necesario que dicho sistema cumpla con las siguientes restricciones para tener confiabilidad del mismo, estas son: restricciones de voltaje, restricciones de radialidad, pérdidas eléctricas en nodos, restricciones de carga y por último, prioridad de usuarios [27].

La mayoría de trabajos señalan que un objetivo a largo plazo de un sistema de distribución el cual contenga unidades de GD, es que dicho sistema se adapte con mayor facilidad al concepto de redes inteligentes, de esta manera se logra una eficiencia aceptable. Al utilizar el algoritmo del MST, uno de los objetivos principales es la minimización de distancia entre vanos, de esta manera se obtiene una reducción en el uso de elementos eléctricos y elementos de manipulación [32][33][34].

En este trabajo se utiliza también el algoritmo de Dijkstra, dicho algoritmo permite hallar el enrutamiento entre nodos dentro de una red de distribución eléctrica, para esto es necesario crear una matriz de pesos que contenga valores no negativos;

este algoritmo divide la red de nodos en 3 secciones: nodos no etiquetados, nodos temporalmente etiquetados y nodos permanentemente etiquetados. Inicialmente se inicia con todos los nodos sin etiquetar, en el proceso de búsqueda los primeros nodos se conectan con los nodos más cercanos, a estos nuevos nodos se los define como nodos de etiqueta temporal, en cada ciclo se buscan los nodos etiquetados más cercanos al nodo de origen, los cuales se definen como nodos etiquetados permanentemente, el algoritmo se detiene hasta que todos los nodos tengan etiqueta permanente o la función objetivo sea cumplida [35].

La importancia del uso de la teoría de grafos en redes eléctricas, también puede ir más allá que solo al análisis del diseño de sistemas de distribución o transmisión en redes eléctricas, una aplicación importante que destacar es que este tipo de análisis se puede proponer también para el diseño del recorrido de electrobarras de distribución en bajo voltaje, específicamente en conjuntos residenciales, una de las problemáticas actuales es el alto costo en los sistemas tradicionales, en el cual se usa cable de cobre con cubierta aislante para la distribución de circuitos eléctricos, con la ayuda de la teoría de grafos se puede encontrar un enrutamiento óptimo, incluso para el dimensionamiento óptimo de un sistema eléctrico de distribución en medio voltaje, las cuales poco a poco se han ido introduciendo en el mercado nacional e internacional

2.5 Resiliencia en sistemas de distribución

El algoritmo del MST se caracteriza por ser un método determinista y tiene la capacidad de resolverse en tiempo polinómico, dentro del MST existen dos algoritmos, los cuales son mayormente utilizados para resolver

redes de sistemas eléctricos, estos son el algoritmo de Prim y el de Kruskal; el algoritmo de Prim sirve para resolver la restauración de sistemas eléctricos minimizando la cantidad de elementos a utilizar, y el algoritmo de Kruskal sirve para resolver una óptima reconfiguración de sistemas eléctricos [9], en este trabajo se hace el análisis de estudio con el algoritmo de Prim.

El mejoramiento de resiliencia aplicado en sistemas de GD a la red de distribución, únicamente se puede lograr acompañando al nuevo sistema con elementos inteligentes que resultan ser necesarios para tener un mejoramiento en los niveles de confiabilidad, además que el uso de varios elementos como: disyuntores, reconectores, seccionadores, protecciones y controladores remotos son de mucha importancia para lograr la estabilidad y confiabilidad del sistema. Debido a que una inversión de elementos automatizados en un sistema eléctrico de distribución es muy elevada, la mejor opción es encontrar la óptima ubicación de estos elementos clave y así reducir el número de implementación de los mismos [36].

Los niveles de resiliencia pueden aumentar en gran escala, al crear sistemas eléctricos de distribución aislados, los cuales, pueden llegar a ser abastecidos solo con el uso de unidades de GD, sin depender de la red eléctrica local, para obtener buenos resultados, la teoría de grafos es una herramienta que ha sido estudiada y aplicada por varios investigadores que destacan su importancia en cuanto a niveles de confiabilidad [37] [38].

3. Caso de estudio

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo matemático que permita encontrar la óptima ubicación y dimensionamiento de un sistema eléctrico

de distribución, tanto de medio como de bajo voltaje, integrando al sistema unidades de GD, usando la teoría de grafos para su implementación. Para ello se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones: restricciones físicas existentes de la zona seleccionada, información de coordenadas geo-referenciadas, ubicación, dimensionamiento y el análisis del tipo de fuente de generación eléctrica de las unidades de GD que mejor se adapten de acuerdo a las condiciones ambientales y físicas de la zona, para integrarlas al sistema de distribución eléctrico, ubicación y dimensionamiento de los transformadores de distribución, la demanda requerida de los usuarios consumidores y el tipo de cableado de medio y bajo voltaje. Es así que, se obtiene la información de una zona que tenga la posibilidad de implementar un sistema de distribución eléctrico usando unidades de GD. De esta forma, se analiza la óptima ubicación y dimensionamiento de: transformadores de distribución, líneas eléctricas de distribución tanto de medio como de bajo voltaje para la conexión de las acometidas hacia los usuarios finales, unidades de GD a instalar y el número de usuarios finales a los cuales se van a abastecer.

De esta manera, se pretende armar un sistema eléctrico de distribución que contenga: transformadores de distribución, unidades de GD y usuarios finales, a estos elementos mencionados anteriormente para el análisis con la teoría de grafos se los denominará como: nodos o vértices de la red, a las líneas de distribución y acometidas principales que llegan hasta los usuarios finales se los denominará como: ramales o conexiones de la red; tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se empieza a desarrollar el estudio para la implementación de una nueva red.

En este trabajo, se utilizan 2 tipos de algoritmos: el algoritmo de Prim y el algoritmo de Dijkstra, los cuales, como se mencionó anteriormente, ayudan a resolver el algoritmo de MST, y por consecuencia, nos da una idea general de cuál debe ser la ruta del sistema eléctrico de distribución tanto de medio como de bajo voltaje.

La función objetivo de este modelo matemático es minimizar la distancia de la red de distribución de medio voltaje y dimensionar de forma autónoma la conexión de las acometidas de bajo voltaje según el número de usuarios finales con los transformadores de distribución.

Es así que, el algoritmo de Prim tiene la restricción de distancia mínima para que las conexiones entre nodos sean no mayor a 100m, considerando que usualmente, el espacio lineal de dos esquinas generadas por la intersección de una calle no supere a este valor. En el algoritmo de Dijkstra, se pone como restricción, de igual manera, la misma distancia de 100m, ya que es la distancia mínima donde estará ubicado el transformador de distribución más cercano, es así que, al momento de generar la matriz de pesos, si se supera esta distancia el valor del enlace para la conexión entre ramales será 0, caso contrario, el valor será 1.

En la tabla 2, se muestran el pseudocódigo del algoritmo de Prim. En primer lugar, se cargan los archivos del mapa seleccionado en formato .OSM y .PNG, posteriormente se procede a ingresar las coordenadas de latitud y longitud (xs,ys), obtenidas de la ubicación de los usuarios finales, para ello se usa el servidor web llamado Open Street Map. Se procede a asignar el valor de restricción de la distancia mínima, una vez ingresados estos valores, se aplica el algoritmo de Prim, el cual grafica la resolución del MST, haciendo el enrutamiento de la nueva red eléctrica de distribución de medio voltaje en el mapa seleccionado.

Tabla 2. Pseudocódigo del algoritmo de Prim

Algoritmo de Prim
Paso 1: Inicio
Paso 2: Ingreso del archivo del mapa seleccionado en formato .OSM y .PNG
Paso 2.1: Ingreso de coordenadas de usuarios finales (Xs,Ys)
Paso 3: Asignación del valor de restricción $dmin$
Paso 3.1: Distancia para enrutamiento
<pre> for $i = 1: length(Xs)$ for $j = 1: length(Xs)$ $dist(i,j) = (haversine ([S(i,1)] S(i,1)$ $[S(j,2) S(j,1)]));$ $dist(i,j) = (haversine ([S(i,1)] S(i,1),$ $[S(j,2) S(j,1)]));$ end $dist(i,i) = 0;$ </pre>
end $G = dist \leq dmin;$
Paso 4: Algoritmo de Prim $SOL = prim_mst(sparse(G));$ $[ii,jj] = find(SOL);$ $sln = [ii,jj]$
Paso 5: Visualizar
<pre> for $i = 1: size(sln,1)$ $z7 = plot([xs(sln(i,1)) xs(sln(i,2))],$ $[ys(sln(i,1)) ys(sln(i,2))],$ </pre>
end
Paso 6: Fin

En la tabla 3 se desarrolla el pseudocódigo de la implementación del algoritmo de Dijkstra. Con los resultados obtenidos del algoritmo anterior, se procede a ingresar la ubicación de las coordenadas de los transformadores de distribución (xt,yt) y unidades de GD (xgd,ygd), posteriormente se asigna la restricción del valor de la distancia mínima para la conexión entre usuarios consumidores y nodos de bajo de voltaje, de esta manera se crea la condición de que si supera esta distancia el valor de la matriz G es infinito, caso contrario se mantiene con el valor asignado.

Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo de Dijkstra

Algoritmo de Dijkstra

Paso 1: Inicio

Paso 2: Ingreso de coordenadas de transformadores de distribución (xt,yt) y unidades de GD (xgd,ygd)

Paso 3: Asignación del valor de restricción
dmin

Paso 3.1: Distancia para enrutamiento
for *i* = 1: *length(Xs)*
 for *j* = 1: *length(Xs)*
 dist(i,j) = (haversine ([S(i, 1)] S(i, 1)
 [S(j, 2) S(j, 1)]));
 dist(i,j) = (haversine ([S(i,1)] S(i,1),
 [S(j,2) S(j,1)]));
 end
G(dist > dmin) = inf

Paso 3.2: Desarrollo de la matriz de pesos

$$G = \begin{bmatrix} N_{11} & I_{11} & M_{11} \\ N_{12} & I_{12} & M_{12} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ N_{ij} & I_{ij} & M_{ij} \end{bmatrix}$$

Paso 3.3: $G2(N + I + M) = variable$

Paso 4: $G3 = G * G2$

Paso 4.1: *dijkstra_A(G3, N + I + M)*

Paso 5: Visualizar
z1 = plot(xs,ys)
z2 = plot(xgd,ygd)
z3 = plot(xt,yt)

Paso 6: Fin

A continuación, se crea una matriz de dimensión igual a la suma de los elementos de transformadores de distribución, unidades de GD y usuarios finales. A cada uno de los elementos mencionados anteriormente, se asigna un valor, que representa a la importancia de conexión entre cada nodo, por ejemplo, la conexión entre usuarios finales y transformadores de distribución tendrá un valor de peso alto ya que es muy probable que se conecte,

mientras que, el valor de peso para la conexión entre usuarios finales y unidades de GD tendrá un valor bajo ya que es menos probable que se conecten entre sí, de esta manera se genera la matriz de pesos. Obtenidos estos valores, se hace la multiplicación de la matriz G con los valores mencionados anteriormente. Finalmente con la matriz obtenida resultante se aplica el algoritmo de Dijkstra, los resultados obtenidos se grafican, obteniendo así, la conexión final de usuarios finales con transformadores de distribución y las unidades de GD.

Se considera para este estudio, una demanda unitaria de 4.75kVA por usuario, la cual logra abastecer la demanda para las siguientes consideraciones: calentamiento eléctrico de agua, cocina de inducción, el uso de electrodomésticos y equipos electrónicos, así como secadoras eléctricas y artefactos de calefacción de aire, esta información está basada en la “Guía para diseño de redes para distribución parte A” de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), tabla número 3 llamada “Demanda máxima diversificada considerando la utilización de equipos eléctricos para uso general, cocción y calentamiento de agua”, extraída del apéndice A-11.03 (EEQ S.A., p. 85). De esta manera, se asegura que cualquier usuario que este dentro de una categoría residencial pueda pertenecer a la red propuesta y tenga la posibilidad del uso de los artefactos mencionados anteriormente sin la necesidad del uso de gas, contribuyendo al concepto de GD.

Primero se selecciona una zona geo-referenciada en donde se requiera proponer la nueva red de distribución. En este ejemplo se considera una zona conformada de viviendas tipo casa; debido a que si se consideran edificaciones de tipo verticales, es decir edificios, la cantidad de usuarios es muy grande y por consiguiente la demanda

aumenta considerablemente; por lo tanto, no habría posibilidad de abastecer a tal demanda con las unidades de GD existentes, a menos que en un futuro se modifiquen las condiciones de eficiencia con el objetivo de aumentar y estabilizar la potencia de salida de dichas unidades de GD, en este caso de paneles fotovoltaicos. Para ello se ubican las coordenadas georeferenciadas del número de usuarios consumidores de acuerdo a la zona seleccionada; el mapa que se ha seleccionado consta de 12 manzanas con un total de 264 usuarios consumidores y cuenta con el suficiente espacio para colocar unidades de GD. Como se muestra en la figura 4, mediante el uso de scripts en MatLab se traza todas las posibles rutas e intersecciones en el mapa seleccionado, las cuales están delineadas de color magenta y los usuarios están representados con puntos azules.

Una vez obtenida la información de la ubicación de los usuarios finales, los cuales

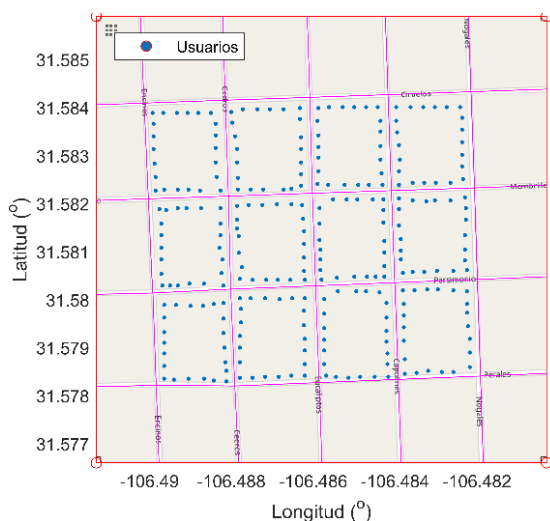


Figura 6. Usuarios consumidores georeferenciados

se van a abastecer de energía eléctrica con la nueva red de distribución, se aplica el algoritmo de Prim con la ayuda del software MatLab, este permite resolver linealmente la ruta del MST, es decir, que mediante el algoritmo propuesto se traza las nuevas conexiones entre nodos de medio voltaje

respetando las restricciones físicas existentes, siguiendo el enrutamiento de las calles, de tal manera que llegue a abastecer de energía a todos los usuarios finales.

La nueva red eléctrica de distribución propuesta puede ser aérea, utilizando postes cada cierta distancia, en los cuales todos los elementos eléctricos necesarios están ubicados en la parte superior mediante estructuras de soporte mecánico y su sistema de cableado es a través de conductores sin cubierta aislante, estos pueden ser cable de aluminio o cobre; por otro lado, la red propuesta puede ser de tipo subterránea, utilizando mangueras de polietileno reforzado como canalización y pozos de revisión cada cierta distancia, el sistema de cableado en este caso, debe ser con cubierta aislante, de igual manera el tipo de conductor puede ser de aluminio o cobre

La red puede ser de tipo subterránea siempre y cuando no existan cuerpos que obstaculicen el enrutamiento de nodos. Cabe recalcar que la ubicación de estos cuerpos no pueden ser analizados en este proceso.

Para la implementación de la red eléctrica de distribución, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: la red eléctrica de medio voltaje puede ser aérea o subterránea, debe existir espacio físico suficiente para ubicar las unidades de GD, ya que las mismas se conectan a los transformadores de distribución, por consecuencia entre más pequeña sea la potencia de los transformadores se necesita un menor espacio físico para las unidades de GD. Ingresado los datos mencionados anteriormente, se procede a resolver el MST con el algoritmo de Prim, este algoritmo traza la nueva ruta de un sistema de distribución optimizado como se puede apreciar en la figura 5. Las líneas de color

azul indican la nueva ruta optimizada del sistema eléctrico de distribución.

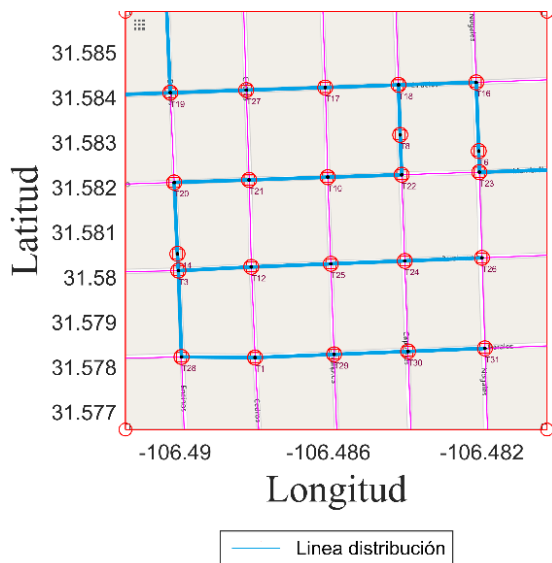


Figura 7. Aplicación del algoritmo de Prim

Una vez conocida la ubicación de los usuarios finales y la ruta de la red eléctrica de distribución propuesta, se ubican geo-referenciadamente los transformadores de distribución conjuntamente con las unidades de GD, la función de las unidades de GD es que aporten al sistema con potencia activa en los nodos de bajo voltaje, de esta forma, se aumentan los perfiles de voltaje, entregando al sistema un mayor nivel de confiabilidad y resiliencia a la red.

En el cálculo de la demanda necesaria para abastecer a todos los usuarios consumidores de este estudio, se tomó como referencia la tabla perteneciente a la EEQ que se mencionó anteriormente, estos valores varían de acuerdo al dimensionamiento hecho por la empresa local encargada de supervisar, monitorear e implementar los sistemas de distribución eléctricos. Se tiene un total de 264 usuarios consumidores, entonces se extrae el valor necesario para abastecer la demanda de todos los usuarios de la tabla mencionada, la cual indica que se requiere una potencia total de 450kVA.

En este estudio, se considera que para el correcto dimensionamiento de la red eléctrica de distribución, la carga para abastecer al alumbrado público y una futura expansión, se deja un total de 50kVA. Por lo tanto se añaden 50kVA, siendo necesario un total de 500kVA para alimentar a todo el sistema eléctrico de distribución propuesto. Para ello, es necesario separar por circuitos a cierta cantidad de usuarios, ya que no se podría abastecer con un solo transformador a todo el sistema de distribución, por lo que en este análisis se utilizan 10 transformadores de distribución con una potencia normada de 50kVA cada uno. Dando como resultado los 500kVA que es lo necesario para alimentar de energía eléctrica a todo el sistema. Las unidades de GD están dimensionadas de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2), por lo que para este estudio, se necesita que cada unidad de GD entregue una potencia de 10kW, dichas unidades de GD están conectadas en el mismo nodo de bajo voltaje donde se conectan los transformadores de distribución.

Se procede a ubicar geo-referenciadamente los transformadores de distribución y las unidades de GD, tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente, de esta forma se seleccionan los nodos centrales y finales de la línea de distribución propuesta para lograr abastecer de energía eléctrica a todos los usuarios consumidores. La distancia de acometida desde los nodos de bajo voltaje hacia los usuarios consumidores ha sido restringida de acuerdo a la restricción de la distancia mínima asignada, de esta manera se asegura que cada transformador no exceda la cantidad de usuarios que puede llegar a abastecer.

Posteriormente se arma una matriz de pesos, la cual nos indica la prioridad de conexión tomando en cuenta la distancia entre los nodos de bajo voltaje y los usuarios consumidores. Se ingresa la restricción de distancia mínima para asegurar el alcance de conexión de los usuarios consumidores a los nodos de distribución, para este proceso se hace el uso de otro algoritmo, esta vez el de Dijkstra. Una vez resuelto el algoritmo en el software se puede observar gráficamente la conexión de los usuarios finales a cada uno de los transformadores de distribución y la conexión de las unidades de GD a dichos transformadores, como se muestra a continuación en la figura 6.

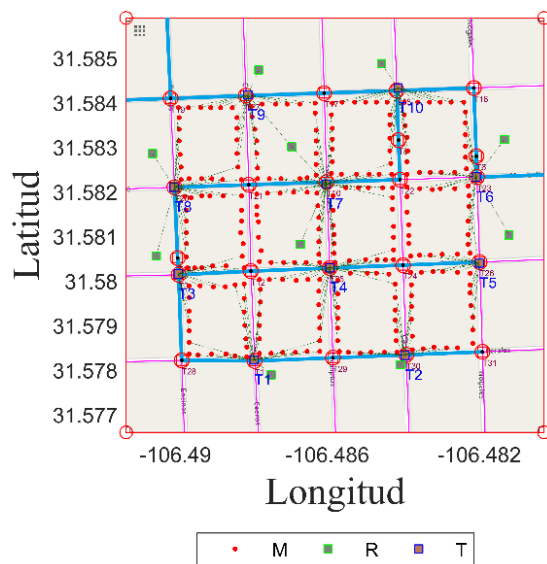


Figura 6. Conexión de usuarios finales

4. Análisis de resultados

En este capítulo se analiza si los resultados obtenidos en el caso de estudio son viables. Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es crear una óptima red de distribución eléctrica con unidades de GD usando la teoría de grafos para su implementación.

En primer lugar, se hace el análisis gráfico de la nueva red propuesta en el caso de estudio. Como se puede apreciar en la figura 5, el algoritmo de Prim ha resultado ser

viable para trazar el enrutamiento lineal optimizado de una nueva red de distribución eléctrica, la importancia de este paso es que resuelva las rutas del MST, minimizando la trayectoria de conexión entre nodos con las líneas eléctricas de distribución.

En la figura 7, se muestra un detalle de la conexión de los transformadores T1 y T2 obtenidos de la figura 6, en donde se puede apreciar la conexión entre los usuarios consumidores y los nodos de bajo voltaje, en los cuales se encuentran conectados los transformadores de distribución y las unidades de GD.

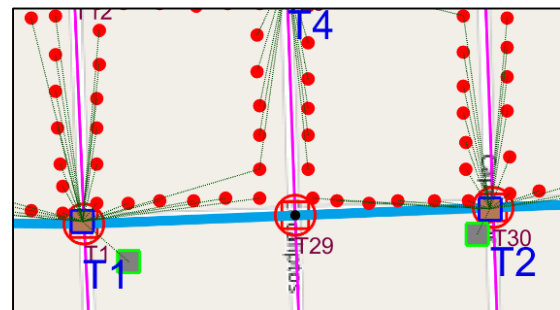


Figura 7. Detalle de conexión de T1 y T2

Como se puede observar en la figura 7, los transformadores T1 y T2 abastecen a los usuarios que se dimensionaron en el caso de estudio, es decir, un aproximado de 25 a 30 usuarios por transformador de distribución, en la figura 6 se observa que todos los usuarios finales están siendo abastecidos de energía eléctrica, las unidades de GD van acopladas a todos los nodos de bajo voltaje. Por lo que la ubicación y dimensionamiento de los transformadores de distribución y unidades de GD ha resultado ser factible. En la figura 6 se puede observar que se respetan las restricciones de distancia mínima aplicadas en el caso de estudio, de esta manera la matriz de pesos para representar y visualizar las conexiones entre los usuarios consumidores, transformadores de distribución y unidades de GD, resulta ser una herramienta útil cumpliendo con los objetivos propuestos. Hasta el momento, el

análisis gráfico ha resultado ser satisfactorio.

Con el enrutamiento del sistema de distribución eléctrico usando unidades de GD basada en la teoría de grafos, es necesario analizar si esta red cumple con los objetivos propuestos, los cuales son: mejorar los perfiles de voltaje, mejorar la resiliencia y la calidad de energía eléctrica, para verificar esto, se hace el uso de un simulador eléctrico, con el cual se analiza a mayor detalle las características de la nueva red.

Con la información obtenida en el caso de estudio, se ha simulado en el software DIgSILENT el nuevo sistema de distribución optimizado, para lo cual se crea un escenario de 10 barras, las cuales están geo-referenciadas, en el lado de bajo voltaje se encuentra conectado como fuente de abastecimiento los transformadores de distribución y las unidades de GD, y como consumo de energía se encuentran conectadas las cargas que representan la suma total de la demanda necesaria de los usuarios consumidores que van a ser abastecidos.

La tabla 3 de resultados indica el escenario sin el funcionamiento de las unidades de GD; es decir que el sistema de distribución se encuentra funcionando solamente con la potencia que entregan los transformadores de distribución.

La simulación fue hecha considerando que estas son líneas de distribución aéreas, el nivel de medio voltaje del sistema es de 6kV, y el nivel de bajo voltaje del sistema es de 0.4kV. Tanto los transformadores de distribución y las unidades de GD están configurados sus parámetros para su correcto funcionamiento.

Como se puede observar en la tabla 3, los resultados de los perfiles de voltaje en por unidad de cada barra van disminuyendo en

cuanto la distancia aumenta desde la fuente primaria de abastecimiento de energía. Esto se debe a que la generación de potencia activa en los nodos disminuye por la inyección de potencia activa de los paneles fotovoltaicos, obteniendo como resultado que los perfiles de tensión aumenten.

Tabla 3. Voltaje en (p.u) del sistema eléctrico de distribución sin GD

Barra	Voltaje (p.u)
1	0.9973
2	0.9950
3	0.9929
4	0.9911
5	0.9895
6	0.9882
7	0.9872
8	0.9864
9	0.9858
10	0.9856

En la figura 8 se muestran los resultados de los perfiles de voltaje sin el funcionamiento de las unidades de GD.

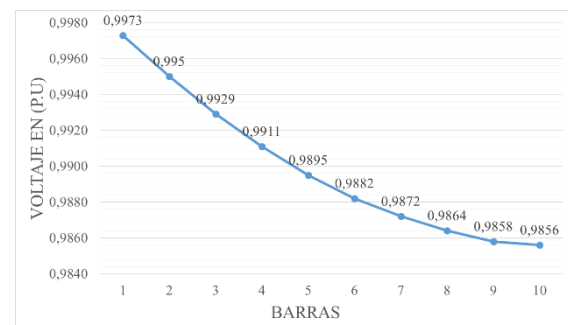


Figura 8. Perfiles de voltaje sin GD

Posteriormente, se hace el análisis de los valores de perfiles de voltaje, esta vez añadiendo a la red el funcionamiento de las unidades de GD, como se mencionó anteriormente, todas las barras de bajo voltaje van acopladas con unidades de GD, ya que lo que se necesita es disminuir las pérdidas en todo el sistema y aumentar los niveles de resiliencia, de esta forma idealizando el escenario en que las unidades de GD funcionen conjuntamente con un grupo de dispositivos inteligentes, como

baterías de almacenamiento de energía y el uso de compensadores estáticos distribuidos regulando de esta manera la potencia reactiva, es así que este conjunto de elementos ayudan a la estabilidad de la potencia de salida de las unidades de GD, la tabla 4 indica los resultados obtenidos.

Como se muestran los resultados de la tabla 4, los perfiles de voltaje han aumentado considerablemente en cada barra con respecto a los resultados de la tabla anterior, esto es debido a que las unidades de GD están en funcionamiento, lo cual hace que se inyecte una potencia activa extra en las salidas de bajo voltaje de las barras, reduciendo de esta manera las pérdidas eléctricas en las líneas de distribución, debido a que aumentan los niveles de voltaje y entregando un mayor nivel de resiliencia al nuevo sistema de distribución propuesto.

Tabla 4. Voltaje en (p.u) del sistema de distribución con GD

Barra	Voltaje (p.u)
1	0.9983
2	0.9968
3	0.9954
4	0.9942
5	0.9932
6	0.9924
7	0.9917
8	0.9912
9	0.9909
10	0.9908

En la figura 9 se muestra la gráfica de los resultados obtenidos en el escenario del sistema con el funcionamiento de las unidades de GD.

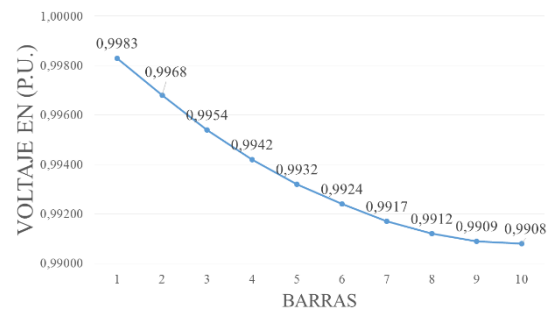


Figura 9. Perfiles de voltaje con GD

5. Conclusiones

La aplicación de la teoría de grafos para el dimensionamiento de una red eléctrica de distribución usando unidades de GD ha cumplido con los objetivos planteados.

El modelo de optimización basado en el algoritmo de Prim ha satisfecho con las expectativas inicialmente planteadas, por ello, el enrutamiento lineal entre nodos ha resultado ser minimizado, trazando la ruta de la línea de distribución de medio voltaje, resolviendo satisfactoriamente el MST. Es así que, se ha logrado abastecer de energía eléctrica a todos los usuarios consumidores. La implementación de unidades de GD en todos los nodos de bajo voltaje del sistema eléctrico de distribución, ha demostrado contribuir al sistema de manera positiva, de tal manera que, han aumentado los perfiles de voltaje, reduciendo las pérdidas eléctricas, aumentando los niveles de confiabilidad y resiliencia en el nuevo sistema eléctrico de distribución. Por lo que, de cierta manera se puede disminuir la cantidad de energía generada en las fuentes de generación primaria, contribuyendo al concepto de GD.

El algoritmo de Dijkstra, para dimensionar la conexión entre usuarios consumidores y los nodos de bajo voltaje, ha resultado ser una herramienta útil, según el dimensionamiento propuesto en el caso de estudio regido por normas locales, se han obtenido resultados satisfactorios; para ello, al diseñar la ubicación y el dimensionamiento equitativo de transformadores de distribución conjuntamente con la utilización de unidades de GD, se obtiene que la distribución del número de usuarios consumidores conectados a cada nodo de bajo voltaje, logran abastecerse de manera óptima sin sobrepasar la cantidad de potencia existente en los nodos de bajo voltaje, cumpliendo de esta manera con la meta propuesta.

6. Trabajos futuros

El dimensionamiento de redes eléctricas de distribución, puede expandirse en más campos del diseño eléctrico. Esta aplicación resulta ser muy útil, en la implementación de redes de bajo voltaje con el uso de electrobarras, específicamente dentro de urbanizaciones, donde tradicionalmente se hace el dimensionamiento de circuitos con cable de cobre y canalización. La aplicación de teoría de grafos con el algoritmo de árbol mínimo de expansión para la distribución de energía de la urbanización con electrobarras de bajo voltaje, puede lograr una optimización considerable. Uno de los problemas actuales es el alto costo de instalación del sistema eléctrico tradicional que la mayoría de veces es con cable de cobre, por lo que un trabajo a futuro viable puede ser el dimensionamiento óptimo de sistemas eléctricos de bajo voltaje en urbanizaciones basado en la teoría de grafos con el uso de electrobarras. Además, se podría reformar el algoritmo, con la finalidad de que el mismo pueda contemplar posibles rutas alternas, dado el caso hipotético que exista algún objeto extraño

que puedo interrumpir el enrutamiento de la acometida.

7. Referencias

- [1] D. Carrión and L. Ortiz, “Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos,” *Ingenius*, no. 10, pp. 44–48, 2013.
- [2] E. Vinson, A. Jurado, and P. Gigli, “Estudio de un sistema de distribución con alta penetración de generación de energía solar,” *Aea*, p. 7, 2014.
- [3] W. J. Lee, “The environmental impact of large scale hydroelectric development: Lessons from three gorges,” *2004 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 2, pp. 1390–1392, 2004.
- [4] Shijiazhuang, “The mathematical model and algorithm of distribution network optimization problems,” *2015 Int. Conf. Mach. Learn. Cybern. Guangzhou, IEEE-2015*, pp. 696–701, 2015.
- [5] A. Swarnkar, N. Gupta, K. R. Niazi, and S. Member, “Efficient Reconfiguration of Distribution Systems using Ant Colony Optimization Adapted by Graph Theory,” pp. 1–8, 2011.
- [6] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. González, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [7] F. P. Benavides Larreina, “Expansión óptima del sistema de transmisión mediante el algoritmo de PRIM,” *Univ. Politécnica Sales.*, p. 18, 2017.
- [8] J. A. Granera, V. M. Valdivia, and M. E. Blandón Dávila, “Aplicación informática KPTS (Kruskal, Prim, Tabu Search),” *Rev. Científica*

- FAREM-Estelí*, no. 17, pp. 81–90, 2016.
- [9] D. P. Montoya and J. M. Ramirez, “A joint application of a genetic algorithm plus the minimal spanning tree for optimizing electrical energy systems,” *45th North Am. Power Symp. NAPS 2013*, pp. 0–5, 2013.
- [10] S. D. Manshadi and M. E. Khodayar, “Expansion of Autonomous Microgrids in Active Distribution Networks,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1878–1888, 2018.
- [11] M. Lwin, J. Guo, N. Dimitrov, and S. Santoso, “Protective Device and Switch Allocation for Reliability Optimization With Distributed Generators,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 449–458, 2019.
- [12] A. Esmailian and M. Kezunovic, “Prevention of power grid blackouts using intentional islanding scheme,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 1, pp. 622–629, 2017.
- [13] L. F. Buitrago Arroyave and J. M. López Lezama, “Valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida en sistemas de energía eléctrica,” *Rev. Tecnura*, vol. 17, no. 36, p. 50, 2013.
- [14] G. D. En, E. L. Sector, and E. Colombiano, “Análisis de prospectiva de la generación distribuida (gd) en el sector eléctrico colombiano,” *Rev. la Fac. Ing.*, no. 19, pp. 81–89, 2004.
- [15] O. D. Montoya, A. Grajales, L. F. Grisales, and C. A. Castro, “Ubicación y Operación Eficiente de Almacenadores de Energía en Micro-redes en Presencia de Generación Distribuida Optimal Location and Operation of Energy Storage Devices in Microgrids in Presence of Distributed Generation,” *Cintex*, vol. 22, pp. 97–117, 2017.
- [16] B. Kruimer, M. Ieee, W. L. Kling, and M. Ieee, “Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, 2011.
- [17] K. Nadhir, D. Chabane, and B. Tarek, “Firefly algorithm based energy loss minimization approach for optimal sizing & placement of distributed generation,” *2013 5th Int. Conf. Model. Simul. Appl. Optim. ICMSAO 2013*, 2013.
- [18] R. S. Zulpo, R. C. Leborgne, and A. S. Bretas, “Optimal siting and sizing of distributed generation through power losses and voltage deviation,” *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, pp. 871–875, 2014.
- [19] S. Su, Y. Hu, L. He, K. Yamashita, and S. Wang, “An Assessment Procedure of Distribution Network Reliability Considering Photovoltaic Power Integration,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 60171–60185, 2019.
- [20] A. Spring, G. Wirth, G. Becker, R. Pardatscher, and R. Witzmann, “Grid Influences from Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters with a Power Factor Specification of One,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1222–1229, 2016.
- [21] A. Vahidnia, G. Ledwich, A. Ghosh, and E. Palmer, “An improved genetic algorithm and graph theory based method for optimal sectionalizer switch placement in distribution networks with DG,” *2011 21st Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2011*, 2011.
- [22] D. Huang, H. Li, G. Cai, N. Huang, N. Yu, and Z. Huang, “An Efficient Probabilistic Approach Based on Area Grey Incidence Decision Making for Optimal Distributed Generation Planning,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 93175–93186, 2019.
- [23] T. Shen, Y. Li, and J. Xiang, “A

- graph-based direct approach for distribution systems with PV nodes,” *2017 8th Int. Conf. Intell. Control Inf. Process. ICICIP 2017*, vol. 2017-Novem, pp. 219–224, 2017.
- [24] G. Chenfang, W. Saiyi, H. Yueshen, W. Zhenhua, and W. Shizhao, “Research on reliability of power grid with distributed generation,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. 201802270000004, pp. 2350–2356, 2018.
- [25] M. Emmanuel, R. Rayudu, and D. Burmester, “Impact of large-scale integration of distributed photovoltaic with the distribution network,” *2016 IEEE Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2016*, 2016.
- [26] S. Roy Ghatak, S. Sannigrahi, and P. Acharjee, “Optimised planning of distribution network with photovoltaic system, battery storage, and DSTATCOM,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 15, pp. 1823–1832, 2018.
- [27] T. D. Sudhakar and K. N. Srinivas, “Power system reconfiguration based on Prim’s algorithm,” *2011 1st Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2011*, no. i, pp. 12–20, 2011.
- [28] T. S. Costa, D. I. Narvaez, M. K. Da Silva, D. G. Lopes, and M. G. Villalva, “An analysis of steady-state and transient effects when adding a photovoltaic generator into the power distribution system,” *2018 13th IEEE Int. Conf. Ind. Appl. INDUSCON 2018 - Proc.*, pp. 717–721, 2019.
- [29] A. Kumar and S. Grijalva, “Graph Theory and Critical Load-Based Distribution System Restoration using Optimal Microgrids Formation,” *Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2018*, pp. 1–6, 2019.
- [30] 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, ICEE-B 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017.
- [31] A. Gaun, G. Rechberger, and H. Renner, “Probabilistic reliability optimization using hybrid genetic algorithms,” *PQ2010 7th Int. Conf. - 2010 Electr. Power Qual. Supply Reliab. Conf. Proc.*, pp. 151–158, 2010.
- [32] S. Dimitrijevic and N. Rajakovic, “Service Restoration of Distribution Networks Considering Switching Operation Costs and Actual Status of the Switching Equipment,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1227–1232, 2015.
- [33] A. Bidram, F. L. Lewis, and A. Davoudi, “Distributed control systems for small-scale power networks: Using multiagent cooperative control theory,” *IEEE Control Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 56–77, 2014.
- [34] H. Suh and C. K. Chang, “Algorithms for the minimal cutsets enumeration of networks by graph search and branch addition,” *Conf. Local Comput. Networks*, pp. 100–107, 2000.
- [35] Y. Hu, Z. Chang, L. Sun, and Y. Wang, “Analysis of the shortest repaired path of distribution network based on Dijkstra algorithm,” *2009 Int. Conf. Energy Environ. Technol. ICEET 2009*, vol. 2, pp. 73–76, 2009.
- [36] Z. Jiang, L. Wang, and W. Chen, “A Distribution Network Islanding Strategy Based on Topological Characteristics to Improve System Resiliency,” *2nd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. EI2 2018 - Proc.*, pp. 1–6, 2018.

- [37] H. Hui, M. Zhao, W. Zhang, and H. District, "Identification of Active Distribution Network Island," no. 51407106, pp. 1767–1771, 2016.
- [38] V. K. P. Kumar, S. Hariri, and C. S. Raghavendra, "Distributed Program Reliability Analysis," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. SE-12, no. 1, pp. 42–50, 1986.

8. Estado del arte

Tabla 5. Matriz del estado del arte

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS																				
		DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Lineas de distribución	Teoría de grafos	Resiliencia	Implementación de GD	Algoritmo del MST	Optimización del sistema eléctrico	Abastecimiento de la demanda	Distancia mínima	Matriz de pesos	Algoritmo de Prim	Algoritmo de Dijkstra	Optimización de líneas	Minimización de pérdidas	Aumento de perfiles de voltaje	Uso de sistemas de GD	
1	2013	Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos	1	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
2	2014	Estudio de un sistema de distribución con alta penetración de generación de energía solar	3	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
3	2004	The environmental impact of large scale hydroelectric development: Lessons from three gorges,	1	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4	2015	The mathematical model and algorithm of distribution network optimization problems	1	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐
5	2011	Efficient Reconfiguration of Distribution Systems using Ant Colony Optimization Adapted by Graph Theory	1	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐
6	2016	Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm	2	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒
7	2017	Expansión óptima del sistema de transmisión mediante el algoritmo de PRIM	1	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS																				
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Líneas de distribución	Teoría de grafos	Resiliencia	Implementación de GD	Algoritmo del MST	Optimización del sistema eléctrico	Abastecimiento de la demanda	Distancia mínima	Matriz de pesos	Algoritmo de Prim	Algoritmo de Dijkstra	Optimización de líneas	Minimización de pérdidas	Aumento de perfiles de voltaje	Uso de sistemas de GD	
8	2019	A Decision-Making Tool for electric distribution network planning based on heuristics and georeferenced data	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	2016	Aplicación informática KPTS (Kruskal, Prim, Tabu Search)	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	2013	A joint application of a genetic algorithm plus the minimal spanning tree for optimizing electrical energy systems	3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	2018	Expansion of Autonomous Microgrids in Active Distribution Networks	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	2019	Protective Device and Switch Allocation for Reliability Optimization With Distributed Generators	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	2017	Prevention of power grid blackouts using intentional islanding scheme	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	2013	Valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida en sistemas de energía eléctrica	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	2004	Análisis de prospectiva de la generación distribuida (gd) en el sector eléctrico colombiano	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	2017	Distribuida Optimal Location and Operation of Energy Storage Devices in Microgrids in Presence of Distributed Generation	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS																			
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Líneas de distribución	Teoría de grafos	Resiliencia	Implementación de GD	Algoritmo del MST	Optimización del sistema eléctrico	Abastecimiento de la demanda	Distancia mínima	Matriz de pesos	Algoritmo de Prim	Algoritmo de Dijkstra	Optimización de líneas	Minimización de pérdidas	Aumento de perfiles de voltaje	Uso de sistemas de GD
17	2011	Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids	1	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒
18	2013	Firefly algorithm based energy loss minimization approach for optimal sizing & placement of distributed generation	1	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒
19	2014	Optimal siting and sizing of distributed generation through power losses and voltage deviation	1	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒
20	2019	An Assessment Procedure of Distribution Network Reliability Considering Photovoltaic Power Integration	1	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒
21	2017	Estudio del impacto de la generación distribuida en sistemas de prueba ieee	1	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
22	2016	Grid Influences from Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters with a Power Factor Specification of One	1	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒
23	2011	An improved genetic algorithm and graph theory based method for optimal sectionalizer switch placement in distribution networks with DG	1	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒
24	2019	An Efficient Probabilistic Approach Based on Area Grey Incidence Decision Making for Optimal Distributed Generation Planning	1	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒
25	2017	A graph-based direct approach for distribution systems with PV nodes	1	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS																				
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Líneas de distribución	Teoría de grafos	Resiliencia	Implementación de GD	Algoritmo del MST	Optimización del sistema eléctrico	Abastecimiento de la demanda	Distancia mínima	Matriz de pesos	Algoritmo de Prim	Algoritmo de Dijkstra	Optimización de líneas	Minimización de pérdidas	Aumento de perfiles de voltaje	Uso de sistemas de GD	
26	2018	Research on reliability of power grid with distributed generation	1	✗	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗
27	2016	Impact of large-scale integration of distributed photovoltaic with the distribution network	1	✗	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	✗	✗	✗	✗
28	2018	Optimised planning of distribution network with photovoltaic system, battery storage, and DSTATCOM	1	✗	✗	□	✗	✗	□	□	□	✗	□	□	□	✗	✗	✗	✗	✗
29	2011	Power system reconfiguration based on Prim's algorithm	1	□	✗	✗	□	✗	✗	✗	□	✗	✗	✗	□	✗	□	□	□	□
30	2019	An analysis of steady-state and transient effects when adding a photovoltaic generator into the power distribution system	1	✗	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	✗	✗	✗	✗
31	2019	Graph Theory and Critical Load-Based Distribution System Restoration using Optimal Microgrids Formation,	1	✗	✗	✗	□	✗	✗	✗	✗	✗	□	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
32	2017	Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm	1	□	✗	✗	✗	✗	□	✗	✗	□	□	✗	✗	□	□	□	□	✗
33	2010	Probabilistic reliability optimization using hybrid genetic algorithms	1	□	□	✗	✗	□	✗	□	□	✗	✗	✗	✗	□	✗	✗	□	□
34	2015	Service Restoration of Distribution Networks Considering Switching Operation Costs and Actual Status of the Switching Equipment	1	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN LA TEORÍA DE GRAFOS																			
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida	Líneas de distribución	Teoría de grafos	Resiliencia	Implementación de GD	Algoritmo del MST	Optimización del sistema eléctrico	Abastecimiento de la demanda	Distancia mínima	Matriz de pesos	Algoritmo de Prim	Algoritmo de Dijkstra	Optimización de líneas	Minimización de pérdidas	Aumento de perfiles de voltaje	Uso de sistemas de GD
35	2014	Distributed control systems for small-scale power networks: Using multiagent cooperative control theory	1	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒
36	2000	Algorithms for the minimal cutsets enumeration of networks by graph search and branch addition	1	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐
37	2009	Analysis of the shortest repaired path of distribution network based on Dijkstra algorithm	1	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐
38	2018	A Distribution Network Islanding Strategy Based on Topological Characteristics to Improve System Resiliency	1	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
39	2016	Identification of Active Distribution Network Island	1	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
40	1986	Distributed Program Reliability Analysis	1	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
			CANTIDAD:	24	32	22	16	29	16	23	14	12	11	13	11	25	15	13	25

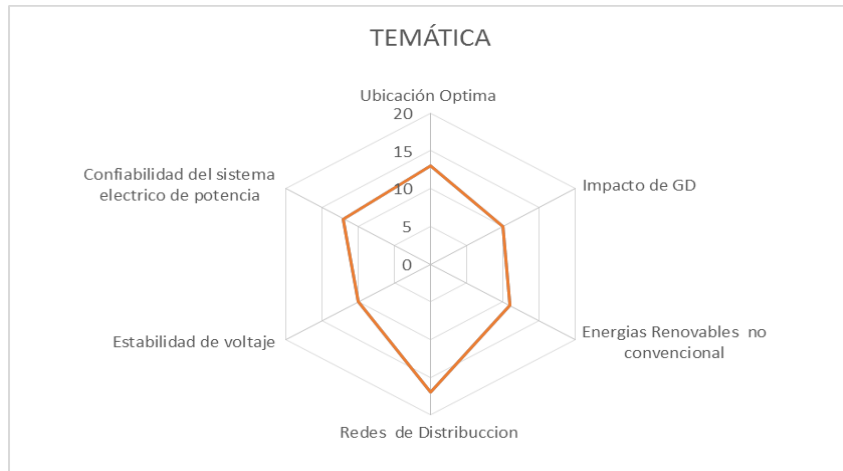


Figura 10. Indicadores de Estado del Arte- Temática.

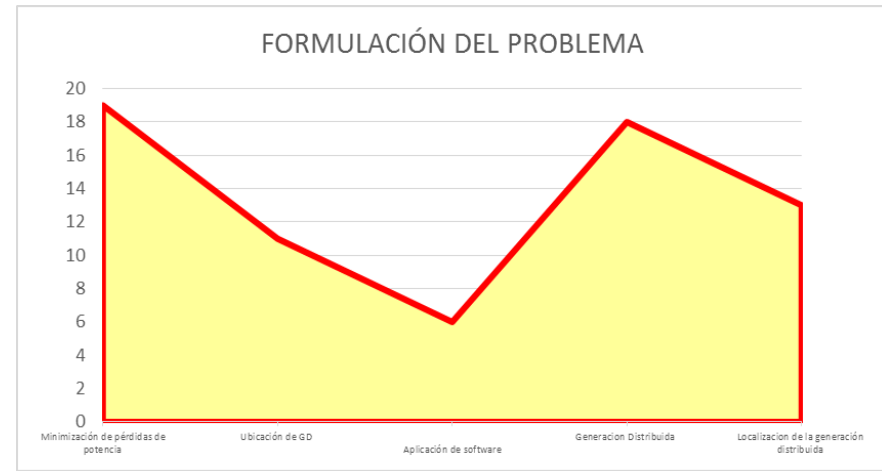


Figura 12. Indicadores de Estado del Arte-Formulación del problema.

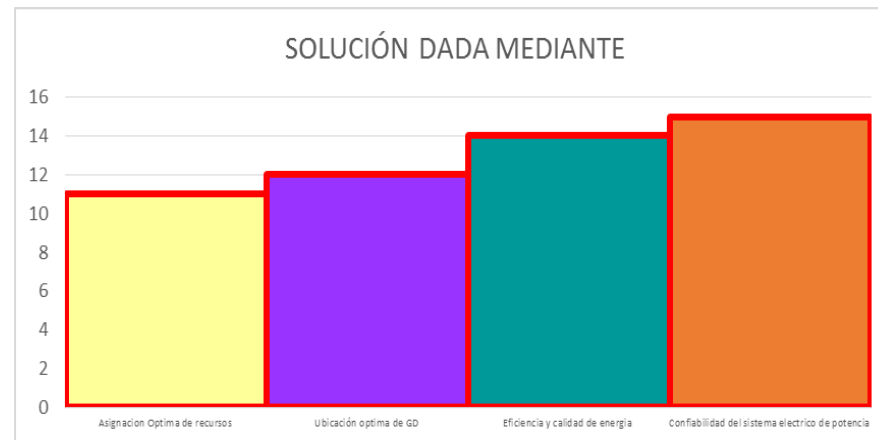


Figura 13. Indicadores del estado de Arte-Solución.