

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU'S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE
DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU'S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE
DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS**

**AUTOR:
JOHN DANIEL TOAPANTA MERINO**

**DIRECTOR:
ALEX DAVID VALENZUELA SANTILLÁN**

Quito, Julio 2019

John Daniel Toapanta Merino

UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU'S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto



John Daniel Toapanta Merino (Y' 1995 – M'02). Realizo sus estudios secundarios en el Colegio Fiscal Mixto Eloy Alfaro en la especialidad de Físico – Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la planeación de redes eléctricas de distribución soterradas, reduciendo el uso de los recursos e implementado un sistema de protección y conmutación reduciendo los costos de operación.
jtoapantam2@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alex David Valenzuela Santillán (Y'1989 – M'12). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013, Además realizó estudios de maestría en Newcastle University en el Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribución Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. avalenzuela@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

©2019 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Alex David Valenzuela Santillán declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU’S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS*” realizado por John Daniel Toapanta Merino, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Julio 2019



Alex David Valenzuela Santillán

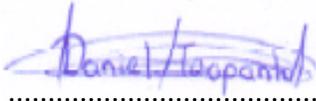
C.C.: 1721848644

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, John Daniel Toapanta Merino con documento de identificación N° 1725703597 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: “*UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU'S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, D.M., Julio de 2019



.....

John Daniel Toapanta Merino

C.C.: 1725703597

1. ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Criterios de instalación de equipos en una red soterrada.....	4
2.1 Topologías de una red de distribución	7
2.2 Equipo de corte y seccionamiento.....	8
3. Formulación del problema.....	9
4. Análisis de resultados	12
4.1 Despliegue y ubicación de RMU's en la red de MV	15
4.1.1 Simulación del sistema en Power Factory.....	17
4.1.2 Análisis de falla en el sistema	18
5. Conclusiones.....	20
6. Trabajos Futuros	20
7. Referencias.....	20
8. Estado del Arte.....	25

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Despliegue óptimo de RMU's en una red eléctrica soterrada bajo un área georreferenciada.....	4
Figura 2. Planificación de red de medio voltaje.....	6
Figura 3. Sistema de distribución Radial	8
Figura 4. Representación de la configuración típica de un RMU	9
Figura 5. Despliegue de una red eléctrica soterrada de distribución.....	12
Figura 6. Distancia al transformador y pozo por usuario.....	13
Figura 7. Demanda de cada pozo de revisión	14
Figura 8. Demanda máxima utilizada por circuito.....	14
Figura 9. Ubicación de RMU's y líneas de conexión	15
Figura 10. Enrutamiento de la red de MV.....	15
Figura 11. Despliegue de la red de MV en Power Factory	16
Figura 12. Conjunto de 3 figuras: (a) Perfil de voltaje del alimentador A; (b) Perfil de voltaje del alimentador B; (c) Perfil de voltaje del alimentador C	18
Figura 13. Reconfiguración del sistema de distribución por una falla.....	18
Figura 14. (a) Perfil de voltaje alimentador A después de una reconfiguración; (b) Perfil de voltaje alimentador B después de una reconfiguración; (c) Perfil de voltaje alimentador C después de una reconfiguración.....	19
Figura 15. Caída de voltaje desde la subestación a cada transformador durante condiciones anormales (%)	20

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables	10
Tabla 2. Algoritmo 1	11
Tabla 3. Algoritmo para la ubicación de RMU's	11
Tabla 4. Datos de la red de medio voltaje.....	17
Tabla 5. Estado del Arte.....	25

UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU'S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS

Resumen

En el presente documento se plantea una metodología para el despliegue óptimo de RMU's (Ring Main Units), basados en procesos heurísticos sobre un plano georeferenciado que nos brinda información acerca del sector seleccionado, obtenido a través de OpenStreetMap. Los equipos de conmutación son utilizados con mayor frecuencia en las redes de distribución, ya que poseen características para incrementar la seguridad y confiabilidad del sistema. Gracias a estos mecanismos se logra reducir el tiempo de desconexión de la red, disminuyendo las pérdidas técnicas y económicas. Para la implementación de los equipos de conmutación en el presente proyecto, se requiere de técnicas que permitan la expansión a un mínimo costo, para ello se hace uso del MST (Minimal Spanning Tree), logrando obtener un enrutamiento mínimo acorde a las necesidades de sistema, además, se asigna la ubicación de los equipos de conmutación para la interconexión entre primarios, en caso de que ocurra algún evento inusual o extremo, reduciendo el tiempo de inactividad del sistema.

Palabras Clave: Reducción de costos, Unidad principal de anillo, seguridad, confiabilidad, equipos de conmutación.

Abstract

The present document proposes a methodology for the optimal deployment of RMU's (Ring Main Units), which is based on heuristic processes on a georeferenced plane that gives us information about the selected sector that was obtained through OpenStreetMap. Switching equipment is used more frequently in distribution networks, since they have features to increase the security and reliability of the system. Thanks to these mechanisms, it's possible to reduce the disconnection time of the network, reducing technical and economic losses. For the implementation of the switching equipment in this project, it's necessary to use techniques that allow the expansion to a minimum cost. For this reason, the MST (Minimal spanning tree) is used, achieving a minimum routing according to the needs of the system. In addition, the location of the switching equipment are assigned for the interconnection between primary elements just in case of an unusual or extreme event might happen, reducing the system's downtime.

Keywords: Reducing of the costs, Ring main unit, security, reliability, switching equipment.

1. Introducción

La utilización de los recursos eléctricos hoy en día se ha constituido como parte primordial en todos los países del mundo, más aún para las regiones que se encuentran en pleno desarrollo. Estos recursos han ido mejorando la calidad de vida de las personas, gracias a las investigaciones realizadas. Es por ello, que la implementación de tecnología más avanzada permitirá reducir el uso de recursos naturales y económicos, brindando una mayor seguridad y confiabilidad a los beneficiarios. Por tal razón, se ha puesto a disposición el uso de equipos que van a maximizar la eficiencia de los sistemas eléctricos, alcanzando un mayor desarrollo del país [1].

Para lograr una adecuada integración de los equipos es necesario considerar una serie de factores, entre los que se destacan la inversión y el tipo de instalación a realizarse, para el caso de estudio, se hace uso de una red eléctrica de distribución soterrada, este tipo de configuración evita la contaminación visual del entorno; de hecho, las redes soterradas alcanzan un menor impacto ambiental, ya que para su instalación no se requiere de la destrucción de la flora y fauna del sector. Gracias a que los elementos se encuentran directamente ubicados bajo tierra, se requiere de una mayor protección, para evitar daños continuos a la red, logrando que los costos por mantenimiento se reduzcan, además, este tipo de instalación ofrece otros beneficios de gran importancia durante su funcionamiento, sin embargo, todos los beneficios quedan opacados por el alto costo requerido para la implementación de estos sistemas [2].

Para poder contrarrestar los altos costos de instalación y las interrupciones debida a fallas en el sistema, se requiere el uso de modelos matemáticos que permitan el despliegue adecuado de la red, además se procura obtener la opción más adecuada para el recorrido de las

diferentes líneas de distribución, que van a permitir la interconexión de los equipos (RMU) en el sistema, logrando un entorno placentero y seguro en las zonas donde se pretenda repotenciar la red. Por el incremento de usuarios a los sistemas pueden asemejarse a un problema intrascendente, sin embargo; por el incremento de la demanda eléctrica a lo largo del tiempo se debe tener en cuenta consideraciones de optimización e ingeniería [3][4].

Ya que los sistemas se han ido incrementando exponencialmente al pasar del tiempo, las dificultades que esto acarrea de igual forma han ido creciendo, logrando causar anomalías durante el funcionamiento y la operación del servicio de energía eléctrica. Para ello se hace uso de equipos que permitan reducir los daños ocasionados por eventos inusuales, es por eso que se recomienda el uso de equipos de corte y seccionamiento logrando alcanzar un sistema sólido y que brinde seguridad, confiabilidad y eficiencia al menor costo posible. Por lo que es de gran importancia la investigación de metodologías, procesos y topologías que van a permitir mejorar la infraestructura del sistema y la calidad del servicio.

Para alcanzar el objetivo propuesto se plantea en el presente trabajo la ubicación y el despliegue de equipos de conmutación como son los RMU's, a través de un proceso heurístico, garantizando el suministro de energía eléctrica a los diferentes consumidores como son residenciales, comerciales e industriales durante cualquier evento inesperado [5]. El sistema antes propuesto, tiene la capacidad de adecuarse ante contingencias y poder soportar el incremento de cargas nuevas o existentes en las diferentes zonas en donde se encuentran ubicados los equipos. La metodología implementada presenta una forma de clusterización, con una serie de enfoques, que ayudan a encontrar la mejor solución al problema

del posicionamiento de los elementos de conmutación. Para la ubicación de los equipos antes mencionados se requiere de elementos esenciales para el funcionamiento de la red como son: ductos soterrados, transformadores de distribución, líneas de distribución soterradas y equipos de corte y seccionamiento, que se posicionaran respectivamente gracias a las coordenadas del mapa seleccionado y las restricciones establecidas, encontrando así, la posición adecuada de cada elemento [6].

Los elementos antes mencionados son de gran importancia para el caso de estudio, los elementos de conmutación o RMU's (Ring Main Units) son parte esencial en una red de distribución soterrada, es una unidad de conmutación que nos permite la interconexión de dos o más segmentos en una misma red, es la combinación de un circuito que nos ayuda a modificar la ruta más conveniente en un sistema de distribución, al igual de brindarnos protección contra alguna contingencia que pueda afectar al sistema o al usuario, poseen cierta semejanza con los interruptores, y es que los RMU's nos permiten la transferencia de carga de un circuito a otro, logrando abastecer rápidamente a los usuarios que se encuentran sin el servicio. Principalmente se componen de interruptores LBS (Load Break Switch) que nos permite poner un sector fuera de servicio sin peligro o problema alguno, independientemente de la carga que se pretenda desconectar, además, cuenta con disyuntores al vacío con seccionador asociado, fusibles e interruptor a tierra para alimentadores de carga, que nos ayudan a proteger los equipos dentro de la red, ya que actúa en caso de una emergencia en él sistema. Además, permiten reducir los daños que puede llegar a causar una desconexión inesperada o simplemente actúa al momento que se produzca una falla en él

sistema, dando mayor confiabilidad y seguridad a los usuarios que se encuentran utilizando el servicio [7].

Para el caso de estudio se requiere de limitaciones o restricciones como la cantidad de usuarios conectados a un alimentador simultáneamente, la capacidad de cada transformador, la caída de voltaje y las distancias máximas permitidas durante la instalación. Teniendo en cuenta los criterios antes mencionados y cumpliendo la normativa de la EEQ, se logra incrementar la vida útil de las instalaciones y los equipos del sistema que se han ido implementado. Todas las consideraciones antes mencionadas van a ser trascendental al momento de realizar la ingeniería práctica [8].

Para solventar los criterios antes mencionados, el presente modelo se enfoca en minimizar las interrupciones ocasionadas por daños en la red, para lo cual en primera instancia se localiza la ubicación más adecuada para la colocación de los transformadores de distribución, por consiguiente, se procede a la agrupación de los mismos, en donde permitirá la selección de cada uno ellos dependiendo de las necesidades de los usuarios [9].

Para los siguientes puntos del modelo implementado, se ha realizado un algoritmo basado en diferentes conceptos, en donde se posibilita el ingreso de las restricciones y ecuaciones para resolver la problemática del sistema. Como segundo punto, al obtener los datos relacionados con el correcto funcionamiento de la red, se logra el despliegue de los circuitos que se encuentran encaminados a zonas urbanas, el enrutamiento se lo realiza acorde a distancias máximas permitidas en la red de medio voltaje, haciendo uso del árbol mínimo de expansión. Como tercer punto se ubican los RMU y se realiza el enrutamiento para la conexión de los equipos de conmutación logrando la reducción de los costos gracias al uso

adecuado de los recursos, a partir de las simulaciones realizadas se puede observar el comportamiento de la red. Como último punto y con la finalidad de presentar un modelo apegado a la realidad se simula en programas

computacionales como son Power Factory y Matlab, con el objetivo de alcanzar un análisis más profundo y técnico de la red durante su funcionamiento [10].

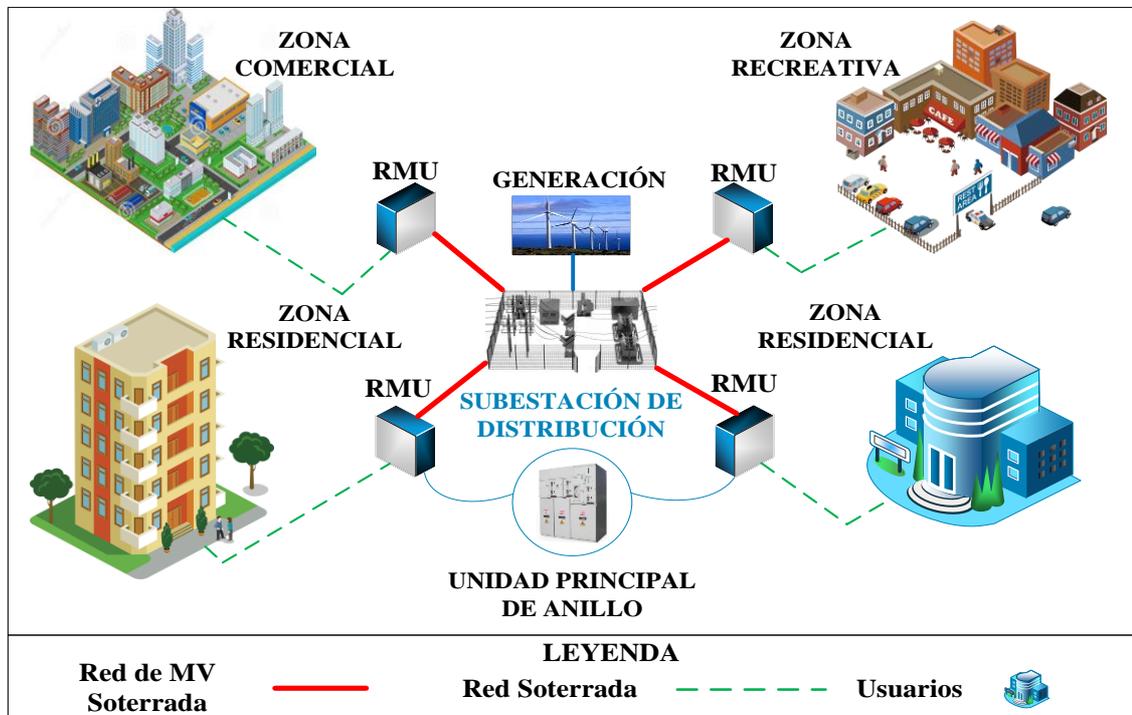


Figura 1. Despliegue óptimo de RMU's en una red eléctrica soterrada bajo un área georreferenciada

2. Criterios de instalación de equipos en una red soterrada

La planificación de una red de distribución (DNP) nos permite encontrar la adecuada ubicación de los componentes nuevos a instalarse en una red como pueden ser líneas de distribución, equipos de conmutación, transformadores, capacitores, reconectores, etc [11]. El propósito es lograr abastecer o brindar el servicio en caso de contingencias a través de los RMU's que se encuentran ubicados en las redes eléctricas soterradas como se puede observar en la Figura 1, logrando afianzar el sistema. En la literatura se tiene en cuenta que existen ciertos tipos de diseños para la creación de redes eléctricas de distribución como son las de nueva

construcción, para expansión y por la operación ya sea por redes aéreas o soterradas [12][13].

Estos diseños son de gran importancia en la actualidad, por razones como los costos de inversión y por la proximidad que se tiene con los diferentes usuarios, dando a conocer que la mayor parte de la inversión realizada en el sector eléctrico será utilizada para la planificación y el mejoramiento de las redes de distribución, tratando de minimizar los costos de inversión, las pérdidas técnicas durante la operación y reducción los tiempos de desconexión durante una falla. Indistintamente de la red que se esté investigando, ya sea soterrada o aérea, no son una labor sencilla, ya que se deben contemplar ciertos obstáculos, al igual que las

limitaciones técnicas y ambientales [14][15].

Por cuestiones de diseño en la actualidad las redes de distribución se ajustan a las diferentes necesidades de cada zona en donde se está suministrando energía eléctrica, estas áreas en su gran mayoría poseen una conexión de tipo radial [16]. Infortunadamente, no puede ser implementada cualquier tipo de red eléctrica, teniendo en cuenta la parte económica y técnica, en otras palabras, para realizar un despliegue de una red de distribución en una zona que se encuentra geográficamente constituida, su instalación va a depender de las necesidades requeridas [17][18].

Tradicionalmente el despliegue, conexión y protección de una red de distribución eléctrica han sido de tipo aérea, por su facilidad y su bajo costo de instalación. Las redes eléctricas aéreas son poco atractivas a la vista, pero permite que las diferentes empresas distribuidoras puedan brindar el servicio, sin embargo, en los últimos años las redes subterráneas han tenido un crecimiento a pesar del alto costo de instalación. Estas redes son utilizadas mayoritariamente en el sector inmobiliario o de vivienda, permitiendo que las redes eléctricas soterradas ganen interés, por el hecho de brindar un atractivo visual a los usuarios, de igual forma, otorga ciertos beneficios tales como proteger los elementos de la red contra los efectos de la naturaleza que pueden provocar algún desperfecto, brindando mayor seguridad para los usuarios y mejora la estética de la ciudad [19][21].

La energía que es distribuida a través de redes eléctricas soterradas es mayormente utilizada por varias compañías de distribución en zonas donde no son permisibles las redes aéreas o no son aceptables por las limitaciones del terreno, por seguridad o simplemente por la apariencia de la urbe.

En la actualidad existen varias maneras para realizar la implementación y operación de un sistema eléctrico soterrado que pueden llegar a ser eficientes y satisfactorios, además requieren de personal calificado y con un alto grado de experiencia para el manejo de métodos de ingeniería y métodos analísticos. Al realizar una comparación con respecto a una red eléctrica aérea la mayor diferencia son los elevados costos de implementación; sin embargo, con anterioridad se ha citado que las redes eléctricas soterradas muestran bondades que permiten maximizar sus beneficios, a pesar de la alta inversión efectuada en comparación a las redes tradicionales. Se puede deducir que en las redes eléctricas soterradas se puede llegar a reducir los costos por operación y mantenimiento, incluyendo la disminución de pérdidas causadas por el hurto de la electricidad a través de conexiones clandestinas o ilegales [22][24].

Para la correcta instalación de una red soterrada, se requiere de ciertos aspectos que se debe tener en cuenta como son las cámaras de revisión a implementarse, la estructura de concreto, la obra civil y los pozos de inspección; para la parte eléctrica se requiere de conductores, terminales de cable, accesorios, equipo de protección y seccionamiento, etc. Por último, para llevar a cabo la ejecución del diseño, se debe considerar la implementación de seguridad, la excavación de la zanja con una profundidad mínima permitida, la protección de los conductores para evitar la corrosión, el aislamiento de los conductores, diseño y levantamiento de las líneas soterradas de distribución, mantener los niveles de voltaje dentro del rango establecido, flujo de corriente a través de los conductores, el incremento de temperatura, las condiciones mecánicas de la instalación, la vida útil de los materiales y por último la reducción de las pérdidas técnicas [25][26].

La mayoría de los aspectos tomados en cuenta para el diseño e implementación en una red soterrada, se basan comúnmente en mejorar o dinamizar la redes ya existentes; sin embargo el sistema que se vaya a implementar debe satisfacer la demanda de las nuevas cargas que vayan a establecerse, considerando la ausencia de las instalaciones, este rediseño es comúnmente conocida como planificación GreenField (campo verde), ya que la empresa responsable empieza a diseñar dicha red en un lugar geográficamente nuevo. Las diferentes técnicas que vayan a utilizarse para la nueva red ya sea esta soterrada o aérea, deben adaptarse a la naturaleza del terreno de la zona en donde se va a implementar; acoplándose a los diferentes cambios que posee una ciudad inteligente [27][28].

Es de gran importancia mencionar los diferentes criterios que se van a aplicar durante la construcción y planeamiento de una red soterrada de electrificación, con la intención de obtener mayor información relevante acerca del desarrollo de la urbe, estas técnicas se muestran a continuación:

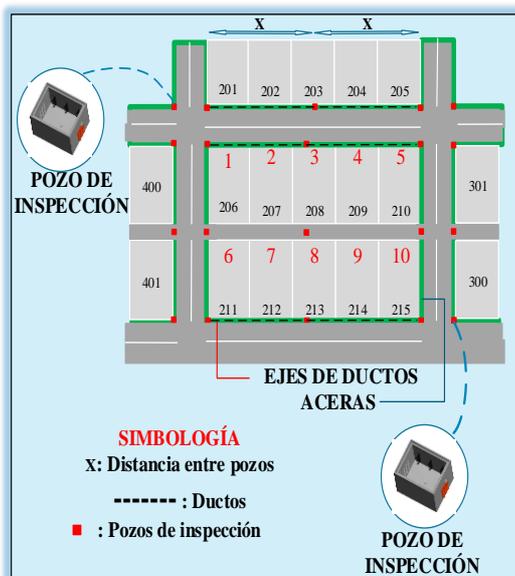


Figura 2. Planificación de red de medio voltaje

El enrutamiento o canalización de las redes soterradas van a ser constituidos por un grupo de ductos y acompañado de tubería de PVC, esta tubería debe ser rígida para lograr que los elementos internos perduren durante el tiempo de uso.

Los pozos de revisión, serán empleados cuando se genere un cambio de tipo aérea a soterrada o viceversa, además, cuando se encuentre una intersección en la ruta antes planificada o cuando los tramos de la red sean demasiado extensos. La distancia a la que se puede colocar los pozos uno de otro va depender del diseño y la planeación, de igual forma los pozos deberán elaborarse antes o después de las cámaras eléctricas, dependiendo de la distancia de tramo y de la edificación del terreno, ya que desde ese punto se realizara o efectuara las diferentes acometidas [29][30].

Durante la construcción de la red soterrada se requiere el uso de cámaras subterráneas, denominadas cámaras de transformación, se va a colocar los diferentes elementos necesarios para el funcionamiento del sistema. Una de las principales características que posee este tipo de cámaras, es que sirven para el uso en bajo voltaje, sin embargo, es recomendable la utilización de tableros trifásicos aislados en gas o en aceite, incluyendo disyuntores termomagnéticos que posean una capacidad de soportar corrientes altas. Al contemplar todos los aspectos antes mencionados se logra una mayor seguridad, operatividad y estética del sistema [31]–[33].

Además es importante tener en cuenta que los conductores más recomendados a utilizarse para redes eléctricas soterradas en medio o bajo voltaje deben ser monopoles de cobre que son resistentes contra la abrasión, se debe utilizar para medio voltaje un nivel de aislamiento de entre 100% y 133% XLPE (Polietileno Reticulado

Termoestable) o también puede ser utilizado el TRXLPE (Polietileno Reticulado Retardante a la arborescencia), estos tipos de aislamientos van a depender del nivel de voltaje a utilizarse como pueden ser 35 kV, 25 kV y 15 kV, en las redes secundarias soterradas, de igual forma se requiere de un tipo de aislamiento acorde al nivel de voltaje, se utilizará un aislamiento PE (Polietileno) y chaquetas de PVC para mantener aislado al cable de los espacios húmedos [34][35].

2.1 Topologías de una red de distribución

Es importante tener en cuenta que para realizar el diseño, planificación y ubicación de RMU's, se debe considerar la topología más apropiada, ya que va a depender de las características del lugar y de los recursos que se posea, teniendo en cuenta las distribuciones tanto en bajo voltaje (BV) como en medio voltaje (MV), para ello se tiene en cuenta la capacidad y el servicio que se vaya a proporcionar. Existen ciertas estructuras básicas como son malladas, anillo o radiales. Sin embargo, la configuración de tipo radial como se puede observar en la Figura 3 es usada comúnmente en la red de bajo voltaje ya que el flujo de corriente circula de forma unidireccional hacia los diferentes receptores, aunque dependiendo de las necesidades del sistema pueden variar sus especificaciones [36]. Este tipo de topología posee ciertas ventajas en parte a su construcción y diseño, una de ellas es la facilidad de operación, sus costos reducidos, además por la simplicidad para la coordinación de las diferentes protecciones que se encuentran debidamente ubicadas, sin embargo, posee una desventaja que es su reducida confiabilidad, ya que, al producirse una falla al sistema, el suministro de energía eléctrica se vería afectado. Para poder alcanzar una topología de tipo radial al menor costo posible, va a depender de

las cargas que se vayan a conectar al sistema, además del enrutamiento de la red de bajo voltaje, el límite térmico de los conductores y el nivel de caída de voltaje permitido, que nos van a beneficiar al momento de realizar la instalación [37][38].

El sistema de tipo anillo posee una característica principal, que a diferencia del tipo radial nos permite transmitir la energía eléctrica por más de un camino, generalmente la topología de tipo anillo son utilizadas en las redes de distribución, pero al pasar del tiempo se han ido acoplando a las redes de medio voltaje, brindando una mayor fiabilidad al momento de producirse daño en las redes eléctricas, además, se subdivide en dos, la topología de anillo cerrado y anillo abierto [39][40].

La topología de anillo cerrado está compuesta por una fuente de alimentación en cada uno de sus extremos, evitando ciertos problemas al momento de producirse una desconexión inesperada, esta topología nos presenta una mayor seguridad al sistema, sin embargo, es menos usada debido a su alto costo de instalación y la dificultad para realizar la coordinación de las protecciones.

La topología de anillo abierto permite que cualquier punto de consumo pueda conectarse a la red por dos caminos, pero el segundo camino solo va ser efectivo en caso de alguna contingencia que pueda ocurrir, esta topología es la más utilizada en la actualidad, debido a que funciona como un sistema radial y ante problemas se activan la otras redes para respaldar la confiabilidad del sistema. De hecho, las redes de medio voltaje poseen configuraciones de tipo radial, ya que el flujo circula unidireccionalmente hacia los diferentes consumidores. Sin embargo, para poder seleccionar la topología más adecuada y la que encaje acorde a las necesidades del diseño, se debe conocer la carga de cada uno de los usuarios, estos se encuentran

catalogados en un rango dependiendo del uso de la energía consumida, estas cargas son clasificadas como: industriales, comerciales y residenciales [41].

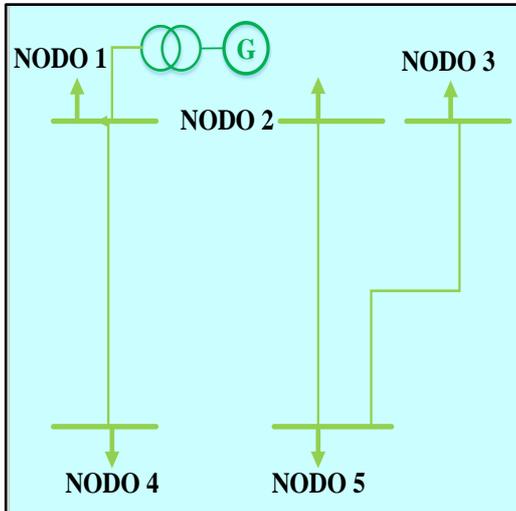


Figura 3. Sistema de distribución Radial

Las cargas de tipo industrial son generalmente clientes que consumen una gran cantidad de energía y en ciertos casos se requiere de instalaciones que se dirigen desde la subestación hacia la empresa que requiere del servicio. Estas cargas de tipo industrial tienen un consumo permanente de energía eléctrica durante las 24h00 horas del día. Las cargas de tipo comercial se encuentran intermedio, entre usuarios residenciales e industriales ya que poseen voltajes de 440 V y 220 V, además de conexiones trifásicas, bifásicas y monofásicas. Las mismas que son comúnmente utilizadas en centros comerciales, restaurantes, etc. Cabe indicar que la zona en donde existe una mayor densidad de carga, la red debe ser mucho más confiable [42].

2.2 Equipo de corte y seccionamiento

Durante el diseño de una red de distribución, ya sean estas aéreas o soterradas, es necesario implementar equipos que permitan maniobrar la red durante eventos inesperados, estos

equipos logran que la instalación se vuelva segura y confiable, tanto para equipos como motores, transformadores, equipos de protección, banco de condensadores, etc., y para los usuarios vinculados a la red [43][44].

Para lograr que la red eléctrica mantenga la confiabilidad y seguridad, es necesario el uso de equipos de conmutación como son los RMU's, es un conjunto herméticamente cerrado de metal, este equipo es utilizado en los diferentes puntos en una red eléctrica de distribución y posee una serie de componentes que son necesarios para poder realizar el seccionamiento o transferencias de carga, al igual que la conexión o desconexión de los usuarios permitiendo la distribución de la energía eléctrica.

De igual forma, los equipos poseen elementos que permiten la protección al sistema en caso de que ocurra alguna falla por manipulación o simplemente por algún suceso externo, estos elementos son relés de protección, interruptor fusible o disyuntor, que se encuentran ubicados en la parte interna del RMU y aislados con gas SF6 (Hexafluoruro de azufre) totalmente sellados, el tipo de aislamiento antes mencionado se caracteriza por su alta confiabilidad, flexibilidad y seguridad al momento de producirse un corto circuito. Sin embargo, los equipos de conmutación no únicamente poseen un aislamiento en gas, también se encuentran aislados por aceite o al vacío, este tipo de aislamiento son utilizados en zonas un poco más industriales y rurales, ya que soportan un ambiente más agresivo. Ya que los equipos poseen un diseño muy compacto, se los puede implementar tanto en zonas internas como externas dependiendo de las necesidades que se requieran, logrando una solución altamente eficaz [45][47].

Los equipos de conmutación o RMU's poseen rangos nominales de voltaje y corriente que permiten un

funcionamiento adecuado del sistema. Ya sea que tengan un aislamiento en gas o en aceite, la estructura no variara y mantendrá las mismas características de fabricación. Si se requiere de un cambio nominal de voltaje, se va a manejar un aumento o disminución de la presión interna del equipo dependiendo de la sustancia o gas que se vaya a utilizar como aislante [48].

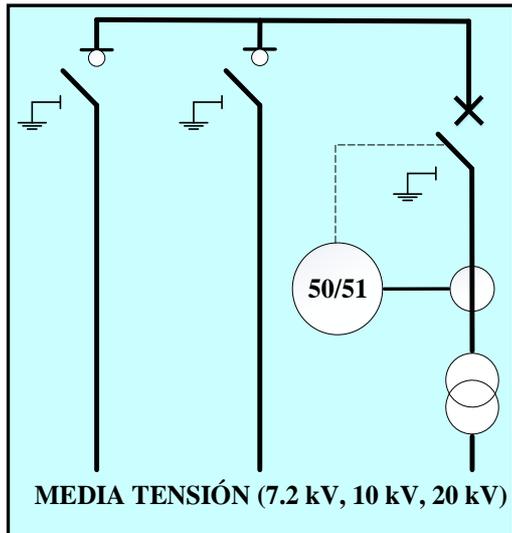


Figura 4. Representación de la configuración típica de un RMU

En la figura 4 se observar la configuración de un RMU, en donde los dispositivos utilizados para los cables de alimentación son los seccionadores, y para la alimentación del transformador de distribución se utiliza el interruptor automático, que funciona como un equipo de conmutación para la transferencia de carga [49]. Estos elementos también pueden llegar a ser utilizados en plantas de energía eólica, plantas de energía solar, pequeñas industrias y para subestaciones secundarias compactas ya que facilita la gestión de la energía eléctrica [50].

3. Formulación del problema

Durante el planteamiento del problema y para la ubicación adecuada de los equipos de conmutación (RMU), se formula el uso de un modelo matemático

fundamentado en métodos heurísticos, que permita minimizar el uso de los recursos durante la instalación y enrutamiento de los sistemas, cumpliendo con los requerimientos técnicos. A su vez uno de los problemas que se desea solventar, es reducir el tiempo de interrupción que se puedan dar por diferentes daños en el sistema.

Para ello se debe considerar el incremento urbanístico que va a poseer una ciudad, este crecimiento va a depender de los usuarios que se encuentren en el sector establecido, por ende, se va a requerir de una mayor seguridad y confiabilidad por parte del sistema, obteniendo como resultado que los equipos se encuentren ubicados en puntos estratégicos para un mejor desempeño, teniendo en cuenta las restricciones técnicas permitidas según la normativa de la Empresa Eléctrica Quito S.A.

Principalmente tenemos como variables el número de usuarios que nos brindan información sobre el área de la vivienda y coordenadas, de igual forma se logra obtener la ubicación de los transformadores de distribución para realizar el enrutamiento de la red de medio voltaje. Además, gracias a las restricciones presentadas y a la información obtenida, se realiza el despliegue de los equipos de conmutación (RMU) haciendo uso de distancias mínimas acorde a la teoría presentada, de igual forma, se requiere de líneas de distribución que van a permitir la interconexión entre primarios y la transferencia de carga, para ello se obtiene la distancia mínima entre RMU's para realizar la conexión a través del camino más apropiado, con ello se logra disminuir los recursos de cableado, ya que posee un menor recorrido durante todo el trayecto. Con lo antes mencionado se puede obtener la función objetivo del sistema que se muestra en la ecuación 1.

$$Fobj = \min \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^t D_{ij} * Cost_{ij} \quad (1)$$

Donde:

t = la cantidad de RMU's instalados en el sistema

D_{ij} = las distancias obtenidas desde los nodos i al j

$Cost_{ij}$ = los costos asociados al trayecto para la interconexión entre el nodo i al nodo j

i,j = ubicación de los equipos de conmutación

A continuación, se detallan las ecuaciones que son necesarias para el diseño, despliegue y ubicación de la red de medio voltaje y los equipos de conmutación en el sistema.

Para ello se hace uso de la demanda de diseño, necesaria para la correcta ubicación de los transformadores de distribución en la red soterrada, como se muestra en la ecuación 2.

$$DD = \frac{DMD + D_{AP} + D_{PT}}{FP} \quad (2)$$

Donde:

DD = Demanda de diseño

FP = Factor de potencia

D_{AP} = Demanda de alumbrado público

D_{PT} = Demanda generada por pérdidas

DMD = Demanda Máxima Diversificada

La demanda del alumbrado público va a depender de las características del proyecto a realizarse, sin embargo, en la normativa utilizada, existen potencias nominales de las luminarias a la que nos debemos regir como son: 100[W], 150[W], 250[W], y 400[W]. La demanda máxima diversificada (DMD) va depender de la cantidad de usuarios que se encuentran conectados a un mismo transformador de distribución, para ello, se hace uso de los estratos por usuario, basados en la normativa vigente de la EEQ.

Para lograr que el modelo sea eficiente, se debe considerar ciertas restricciones con el fin de reducir el uso de los recursos al momento de realizar la implementación de los equipos de conmutación, por lo cual se hace uso de las siguientes restricciones:

$$\Delta V \text{ Medio Voltaje} \leq 3\% \quad (3)$$

La restricción (3) permite el correcto funcionamiento de la red, se requiere que la caída de voltaje en la red de media no supere el 3%, obteniendo que los equipos como transformadores, RMU's y líneas de distribución mejoren su funcionamiento, incrementando su vida útil y mejorando la seguridad del sistema.

$$\text{Distancia}_{ij} \leq \text{Dist_min} \quad (4)$$

La ecuación (4) ayuda a cumplir con la creación del árbol de mínima expansión, permite el enrutamiento de los puntos de conexión tomando en cuenta la posición más cercana entre los alimentadores primarios. Logrando obtener una conexión óptima de los RMU en el sistema.

Las diferentes variables empleadas en los algoritmos para el diseño y despliegue de equipos de conmutación en una red eléctrica soterrada de distribución se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables

Usu	Número de usuarios
xs, ys	Coordenadas de x e y de las viviendas
xpo, ypo	Coordenadas de los pozos de revisión
dist_min	Distancia entre transformadores e intersecciones
Calles	Coordenadas de las calles

Cir_pot	Capacidad máxima de cada transformador
Xgra, Ygra	Posición de RMU's (Latitud y Longitud)
Path	Conectividad de la red de MV y líneas de conexión
Cluster	Número de primarios
dist_n	Matriz de distancias
en, Xs, Ys	Variables para control de bucle
G	Matriz de Conectividad
Trans	Posición de transformadores (Latitud y Longitud)
inicio, final	Coordenadas de la ruta generada
Dist_min	Distancia mínima

Tabla 2. Algoritmo 1

Algoritmo Creación del árbol mínimo de expansión basado en el algoritmo Prim y Dijkstra
Exportar datos georreferenciados obtenido de OpenStreetsMap (OSM)
Inicio:
usu número de usuarios del mapa
Paso 1: Ubicación pozos de revisión
Para todo: ik=size(callesx)
Para todo: jk=size(callesy)
distancia(i,j)=[Xs Ys,calles]
Fin Para
Fin Para
Paso 2: Asignación de la demanda
dem_usu = DMD(a,4) (3)
Paso 3: Dimensionamiento de Transformadores
Cir_pot = Cap_Transformador
Paso 4: Designación de la distancia máxima que posee un grupo de pozos.
Paso 5: Ubicación del Transformador
Ct(ii,1)=min(caída de voltaje)
[e1 e2]=encontrar (min(caída de voltaje)
Trans(ii,1)=[circuito(e2,1) circuito(e2,2)]
Fin Para
Paso 6: Despliegue red de distribución soterrada
Fin

En la Tabla 2, se especifica el pseudocódigo que nos va a permitir realizar el despliegue adecuado de la red de distribución, tomando en cuenta la capacidad máxima de cada transformador, la caída de voltaje durante el enrutamiento de la red y la cantidad de usuarios conectados simultáneamente al sistema.

El segundo algoritmo (Tabla 3) está orientado a obtener la ruta más adecuada para la creación de la red de medio voltaje, a través de la conexión de los transformadores de distribución. Al iniciar el proceso se establece la cantidad de alimentadores primarios que se piensan crear, luego se procede a la división de los transformadores utilizando una metodología que permite la agrupación de los mismos. En la segunda fase se genera el enrutamiento adecuado, basado en la ubicación de los pozos de revisión y de la topología permitida según el mapa seleccionado. Finalmente se procede a la ubicación de los equipos de conmutación (RMU), esta asignación se lo realiza tomando en cuenta los nodos más cercanos entre los alimentadores primarios, alcanzando la ubicación más adecuada a partir de la distancia mínima entre los puntos de conexión. Como resultado se obtiene una conexión entre primarios, con lo que permite aumentar la fiabilidad y la capacidad de recuperación del sistema ante contingencias.

Tabla 3. Algoritmo para la ubicación de RMU's

Algoritmo para el enrutamiento de la red de MV y ubicación de los equipos de conmutación (RMU)
Paso 1:
Exportar datos del Algoritmo 1
Paso 2:
MST red de medio voltaje
Cluster = 3
Clusterización (Trans)
Obtencion Primarios
Par todo i=longitud (Xtrans)
Para todoj=longitud (Xtrans)

```

dist_min=haversine[Trans]
Fin Para
Fin Para
Obtención matriz de conectividad
G(i,j)=0
(G<=Dist_min)=1
Paso 2:
Designar los transformadores a cada cluster
idx=[total transformadores]
Set Algoritmo Dijkstra y Prim
Dijkstra Despliegue de la red MV
Xtr=[Xtrans']
Ytr=[Ytrans']
xyfin=[Xtr Ytr]
kmedoids(xyfin,Cluster)
Para todo ik = 1: Cluster
dist_C=haversine(distancia[Xtr Ytr])
G(dist_C <= dmin) = 1
path = prim(aparse(G))
xytraf = [xtraf ytraf]
Fin Para
Paso 3:
Asignación de equipos de conmutación
dist_n=haversine[Trans]
[Xrec Yrec] = encontrar(min(Dist_m))
path1 = Prim([ Xgra Ygra ])
[Xgra Ygra] = encontrar(min(path1))
Rec = [ Xgra Ygra ]
Paso 4:
Creación de rutas de conexión
Para todo i = 1:klm2
inicio=indic(i,1)

```

```

final = indic(i,2)
Set Algoritmo Dijkstra
Verificar Distancia minima (Dis_m)
Dijkstra → Ruteo de reconectores (i)
distancia(i)=distance
camino(i)=path1
Fin Para
Paso 5:
Obtención de imágenes acorde al modelo
Figura 9: Ubicación de RMU's
Fin

```

4. Análisis de resultados

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos en dos instancias, en primer lugar, se obtiene el comportamiento de una red eléctrica soterrada y la ubicación óptima de RMU's para la interconexión entre primarios haciendo uso del algoritmo formulado, utilizando el software Matlab y en segundo lugar se utiliza el programa Power Factory en donde nos va a permitir realizar la simulación de una red soterrada logrando planificar y enrutar un conjunto de elementos a partir de los datos georreferenciados obtenidos desde OpenStreetMap.

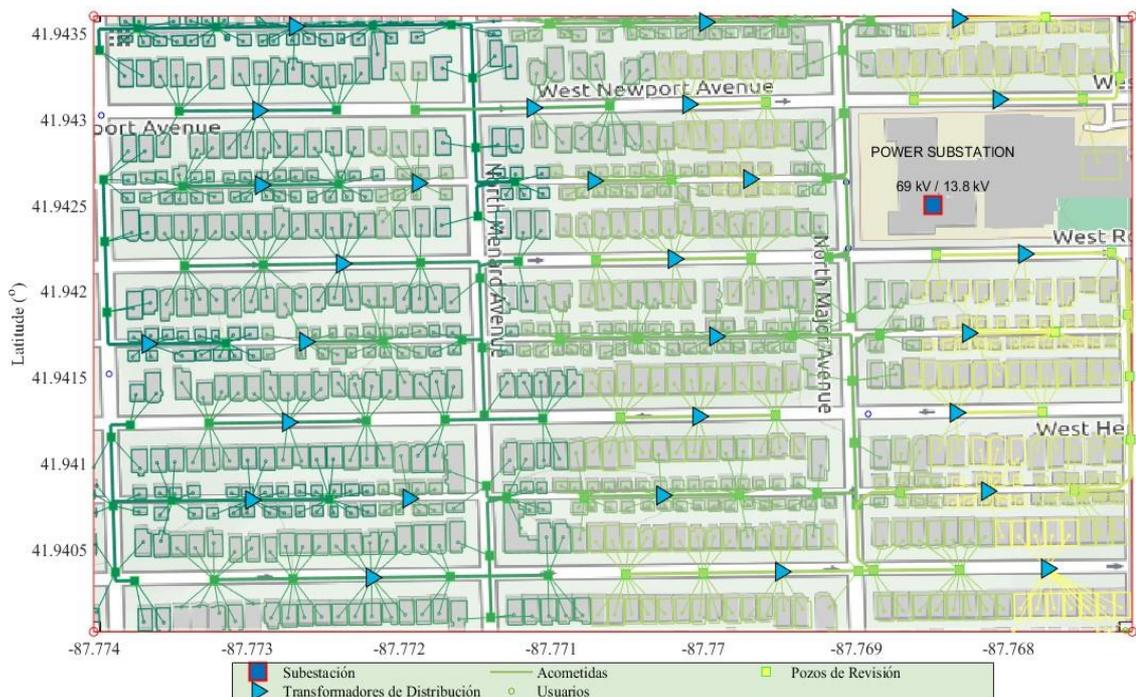


Figura 5. Despliegue de una red eléctrica soterrada de distribución

El modelo matemático se enfoca en la manera adecuada de situar los equipos de conmutación (RMU), por lo que es de gran importancia realizar un análisis completo del sistema, para ello se realizan flujos de potencia, que nos va a reflejar información acerca de los niveles de voltaje, pérdidas, cargabilidad en los cables y caídas de voltaje que se van a presentar cuando la red se encuentre funcionando en condiciones normales. Sin embargo, cuando se produce alguna situación inusual en donde un alimentador se encuentra fuera de servicio, se hace uso de los RMU que nos permiten interconectar la red en caso de contingencias, minimizando las interrupciones producidas por eventos inesperados.

Para la conexión de la red secundaria se toma en cuenta la ubicación y la distancia del transformador más cercano a cada uno de los usuarios finales, quienes se encuentran conectados a la red de bajo voltaje de 220 [V]. Como se puede observar en la Figura 5, se realiza el despliegue de los transformadores de distribución de forma adecuada y eficiente, se han situado considerando la menor caída de voltaje de cada circuito, logrando obtener la mejor posición acorde a la norma de la Empresa Eléctrica Quito.

El lugar seleccionado permite desplegar la red eléctrica de distribución soterrada de acuerdo a los requerimientos del sistema. La ubicación de la subestación se lo ha realizado de tal forma que se encuentra en el centro de masa de la red, por lo cual se toma en cuenta la densidad poblacional propia de la ubicación seleccionada, en donde se encuentran 759 viviendas, se debe considerar que los usuarios conectados a la red se rigen a la capacidad del transformador permitida.

En la Figura 5 se puede observar a los transformadores de distribución que se encuentran representados por triángulos, de igual forma, los pozos de revisión se ven representados por cuadrados, los mismos que se han colocado dependiendo

de la cantidad de usuarios y una distancia máxima permitida, con los elementos antes presentados se va a realizar la conexión de los circuitos, interconectando cada uno de los pozos con un transformador de distribución, logrando brindar el servicio a los usuarios dentro del área asignada, se toma en cuenta que los diferentes colores que se muestran en la Figura 5, sirve para identificar cada circuito que se ha creado durante la expansión de la red.

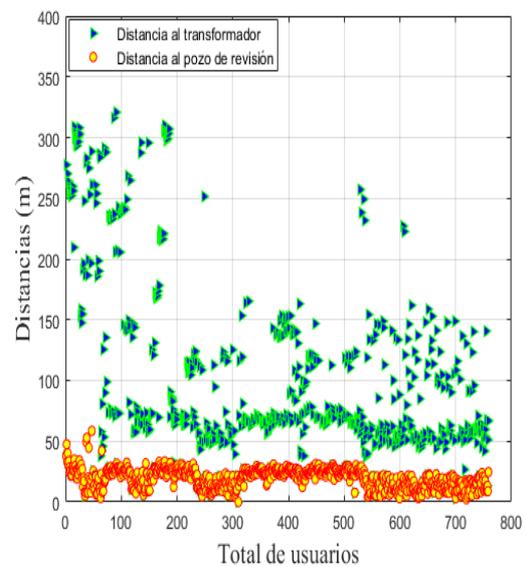


Figura 6. Distancia al transformador y pozo por usuario

Las distancias que se obtuvieron durante el proceso de enrutamiento de la red, son importantes para el análisis del sistema, por ello se puede observar en la Figura 6, las distancias obtenidas desde los usuarios hasta el pozo de revisión más cercano, de igual forma se obtiene la distancia desde el usuario hasta el transformador de distribución más próximo, se llega a apreciar que existen elementos a una mayor distancia, esto se debe a que el transformador posee una mayor capacidad, por ende logra abastecer a los usuarios más alejados, sin embargo, se encuentra cumpliendo con las respectivas restricciones establecidas con anterioridad.

Para ambos casos ya sea para la red de bajo y medio voltaje podemos obtener la longitud del conductor necesario para la instalación, para ello se ha seleccionado

diferentes conductores de alimentación aislados con ciertas características que nos permita colocar directamente en la tierra o en ductos previamente instalados, este aspecto se considera para el diseño de la red soterrada, ya que las características que posea el conductor van a afectar al funcionamiento y rendimiento de los equipos.

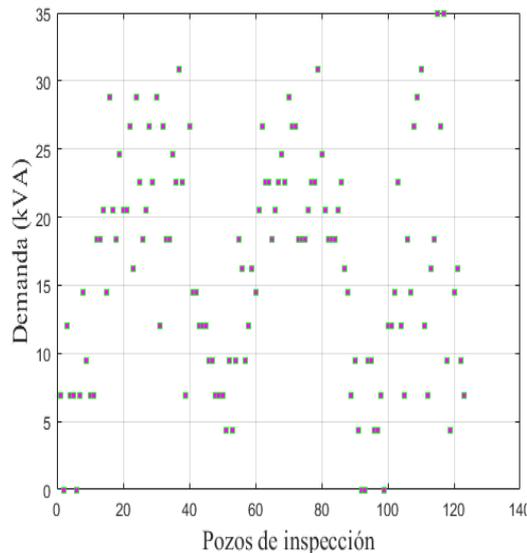


Figura 7. Demanda de cada pozo de revisión

En la Figura 7 se puede apreciar la demanda en cada pozo de inspección, dependiendo de los usuarios conectados, estos valores se establecen según la normativa de la EEQ, en ciertos casos existe una mayor demanda por pozo dado que existe una cantidad mayor de usuarios conectados a un mismo punto. Por otro lado, la demanda obtenida a partir de cada usuario conectado a la red, nos va permitir realizar una conexión entre los pozos y el transformador, requerido para cubrir con la demanda de ese sector, el número de pozos que se pueden conectar a un transformador va a depender de la potencia que pueda

entregar al sistema y de la capacidad misma del transformador seleccionado.

Los transformadores requeridos van a utilizar potencias nominales que se encuentran en la normativa de la Empresa Eléctrica Quito como son 75 100 125 150 200 y 250[KVA], con las potencias máximas establecidas para cada transformador y la demanda de cada usuario, se puede establecer la potencia máxima utilizada por circuito como se observa en la Figura 8, verificando que existen transformadores de menor capacidad, estos se los utiliza para un número reducido de usuarios, mientras que los transformadores que poseen una mayor capacidad se los utiliza cuando las distancias son extensas.

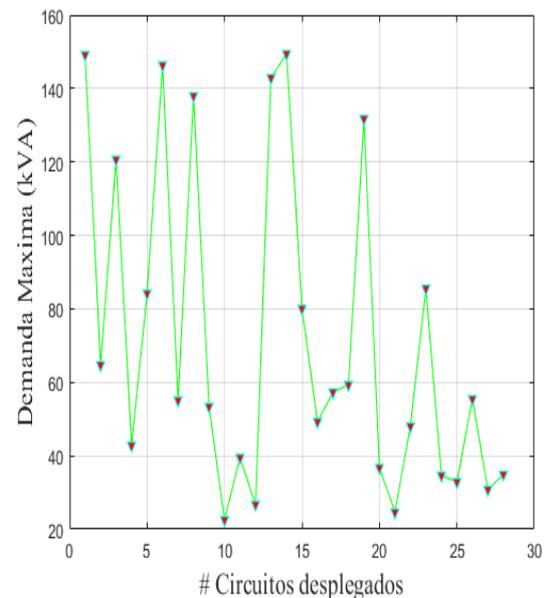


Figura 8. Demanda máxima utilizada por circuito

Cabe recalcar que la implementación de transformadores de distribución que posean una mayor capacidad va a requerir de mayor consumo de recursos que uno de menor magnitud.

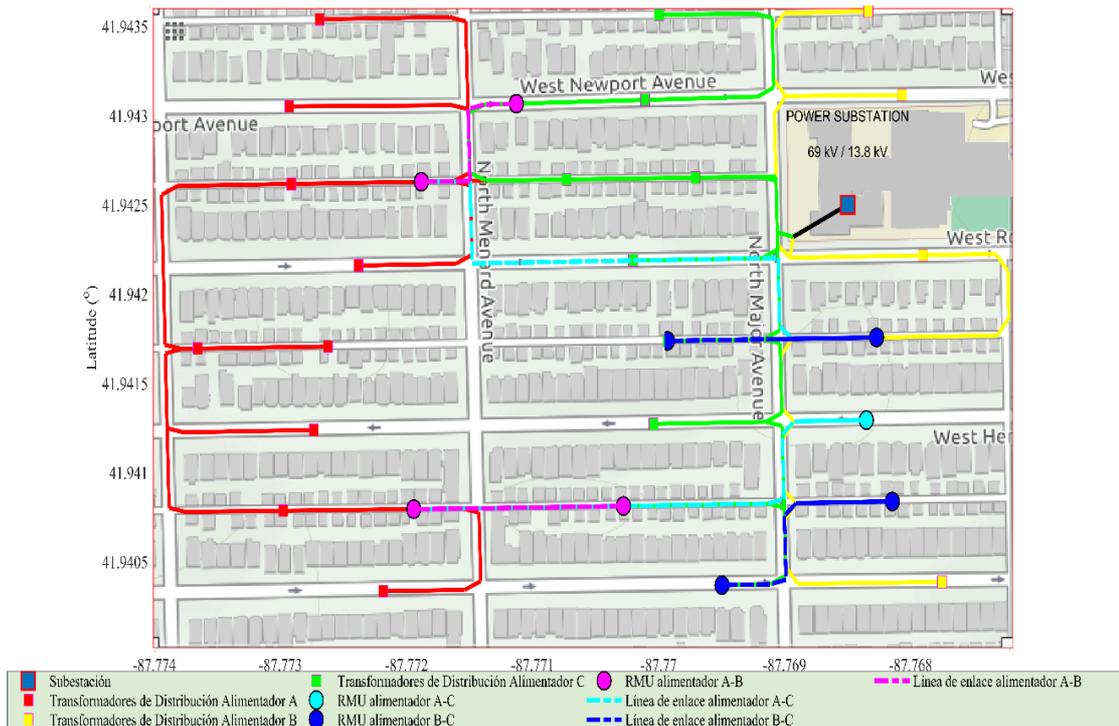


Figura 9. Ubicación de RMU's y líneas de conexión

4.1 Despliegue y ubicación de RMU's en la red de MV



Figura 10. Enrutamiento de la red de MV

Una vez realizado el despliegue de la red eléctrica soterrada, se procede a la conexión de la red de MV en el escenario seleccionado, en donde se lleva a cabo el enrutamiento de los alimentadores primarios, estos se encuentran representados por los colores rojo, verde

y amarillo respectivamente, como se observa en la figura 10.

Para obtener el camino más apropiado de la red de MV se utilizan metodologías basadas en el Minimal Spanning Tree (MST), con este procedimiento se considera el camino más apropiado acorde a las necesidades del sistema, la ruta más adecuada va a ser tomada en cuenta desde la subestación hasta los transformadores de distribución, por ende, el escenario se encuentra formado por 28 transformadores de distribución que se los localiza en los tres alimentadores primarios con una distancia total de 7.15 Km, la longitud de la red se encuentra altamente asociada por la cantidad de transformadores conectados en la misma. Para ello se ha seleccionado cables de medio y bajo voltaje que cumplan con la disposición de longitud que se impone, además, se cumple con la normativa en donde la caída de voltaje no puede superar el 3% en una red de medio voltaje.

Para un mejor alcance, la topología utilizada se basa en una conexión de tipo radial, por la estructura que posee este tipo de conexión, ya que nos permite la

interconexión de los primarios, otorgando la capacidad de transferir y conectar a los usuarios entre alimentadores a través de líneas de conexión, estos elementos tienen la capacidad de soportar la carga generada por alguna emergencia que ocurra durante su funcionamiento, los equipos de conmutación (RMU) se encuentran normalmente abiertos y se accionan en caso de que exista alguna falla en el sistema. El manejo de los equipos se lo puede realizar de forma remota, desde un centro de control, estas estrategias antes mencionadas otorgan al sistema mayor confiabilidad, seguridad y fiabilidad al momento de brindar el servicio, ya que se activarán en caso de contingencias ocurridas durante su funcionamiento, logrando reducir los tiempos de interrupción del sistema, como se puede observar en la Figura 9, la ubicación eficiente de los equipos de conmutación

(RMU) y las líneas de conexión se lo realiza gradualmente a través de tres etapas, primero se determina la distancia más corta entre primarios, los RMU se van a ubicar en posiciones más cercanas entre primarios reduciendo las distancias para la conexión, por ende, va a reducir el costo por la instalación. La segunda etapa es ubicar las posibles rutas por donde se colocarán las redes subterráneas, estas líneas de conexión van a ser colocadas a través de las calles, por ende, se selecciona el camino más corto para su implementación, la distancia seleccionada representa la disminución de los costos de material a utilizarse. La tercera y última etapa se dispone a ubicar de forma adecuada los equipos, basado en los criterios antes mencionados, con esto mejorará la resistencia del sistema y reducirá la inactividad del servicio durante eventos de contingencia.

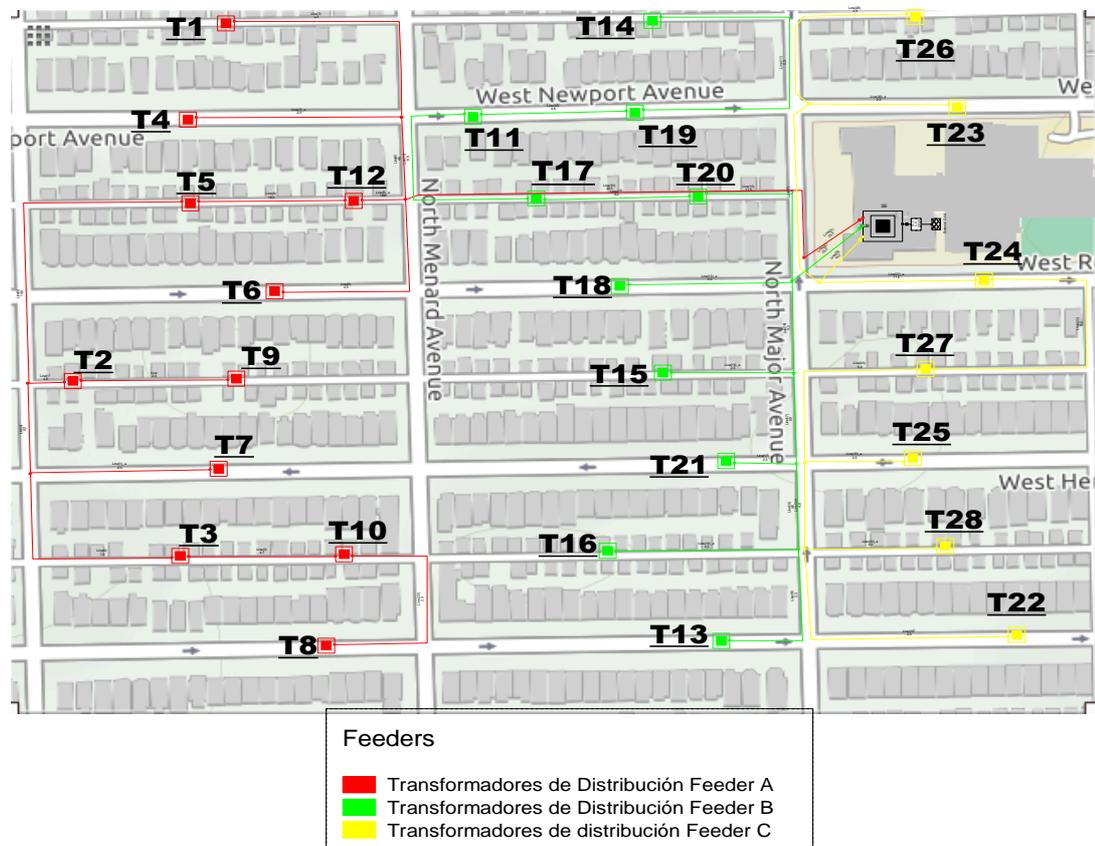


Figura 11. Despliegue de la red de MV en Power Factory

4.1.1 Simulación del sistema en Power Factory

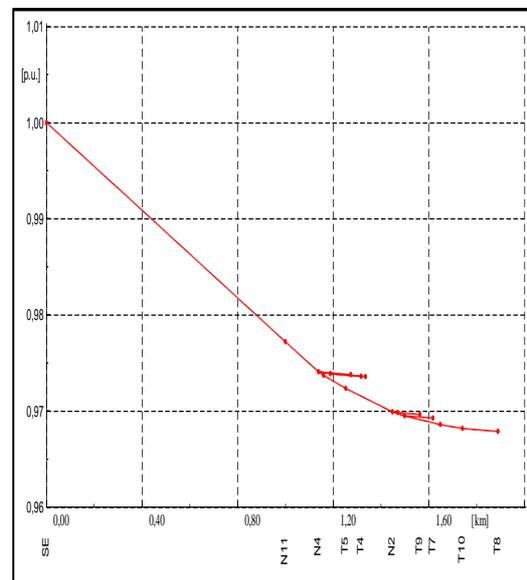
Una vez realizado todo el proceso matemático, para la ubicación de los elementos de conmutación y para el despliegue de la red de MV, se procede a realizar la simulación en el software Power Factory, en donde se puede implementar la red con los datos obtenidos en el modelo. El análisis se lo realiza durante su funcionamiento en condiciones normales, además se considera la interconexión entre el sistema de subtransmisión y la subestación de la zona como se puede observar en la Figura 11.

Con la información recopilada se puede analizar el comportamiento del sistema de distribución, con la implementación de cada uno de los circuitos de la red de MV. Cabe mencionar que el modelo se lo realizó de forma automática obteniendo las coordenadas propias del mapa a utilizarse, permitiéndonos obtener distancias reales al sistema acorde al concepto de georreferenciación, la información obtenida acerca de los circuitos generados en el software se los puede observar en la Tabla 4.

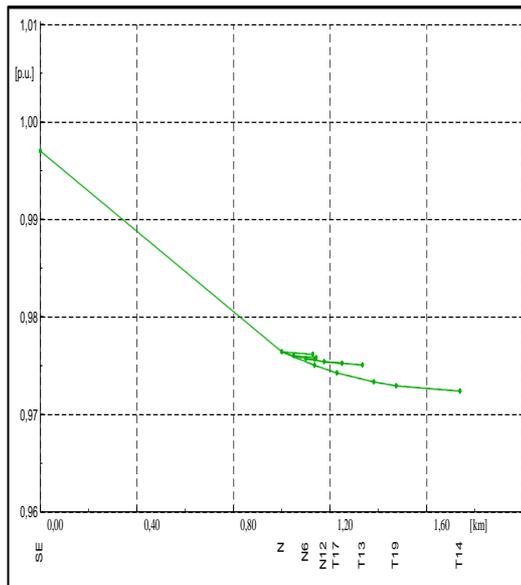
Tabla 4. Datos de la red de medio voltaje

Alimentadores Primarios	#Transformadores de distribución	Longitud red MV km	Usuarios conectados por primarios
Alimentador Primario A	11	3.25	318
Alimentador Primario B	10	2.47	264
Alimentador Primario C	7	1.43	177
Total	28	7.15	759

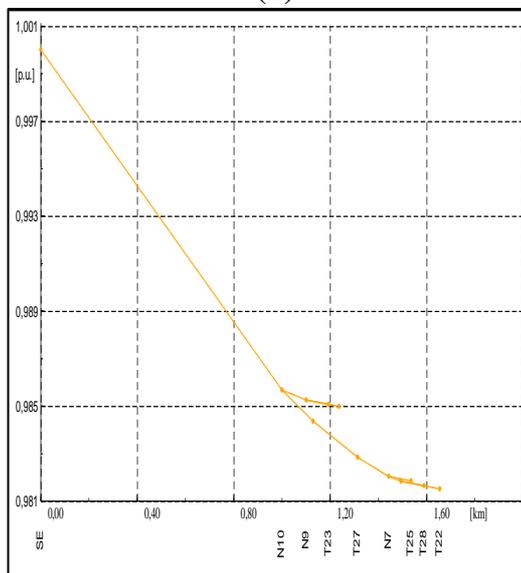
Adicionalmente se obtiene los perfiles de voltaje de los alimentadores primarios A, B y C, donde se representa el comportamiento de la red en condiciones normales, logrando evidenciar que a lo largo del tramo la caída de voltaje se mantiene dentro del rango permitido según la norma, cumpliendo con los objetivos planteados dentro del modelo matemático. La Figura 12 está compuesta en tres sub-gráficos donde los alimentadores primarios se encuentran conectados de forma radial con su respectiva demanda máxima utilizada.



(a)



(b)



(c)

Figura 12. Conjunto de 3 figuras: (a) Perfil de voltaje del alimentador A; (b) Perfil de voltaje del alimentador B; (c) Perfil de voltaje del alimentador C

4.1.2 Análisis de falla en el sistema

Cualquier evento inesperado que ocurra, va a interferir con el normal funcionamiento del sistema, estas anomalías pueden ser causadas por fallas en el aislamiento, manipulación errónea de los equipos o daño físico. En consecuencia, las fallas en los sistemas pueden producirse de forma asimétrica o simétrica, donde una o todas las fases pueden salir afectadas. Sin embargo, los

eventos antes mencionados son casos extremos, en donde los tramos de la red van a salir afectados, dejando sin servicio a los usuarios finales, además, puede producir daños en la infraestructura de los servicios públicos y privados. Durante este acontecimiento los equipos de conmutación (RMU) tienen la función de seccionar los ramales que se encuentran afectados y realizar una reconfiguración de la red con el objetivo de suministrar el servicio y ayudar a la recuperación del sistema.

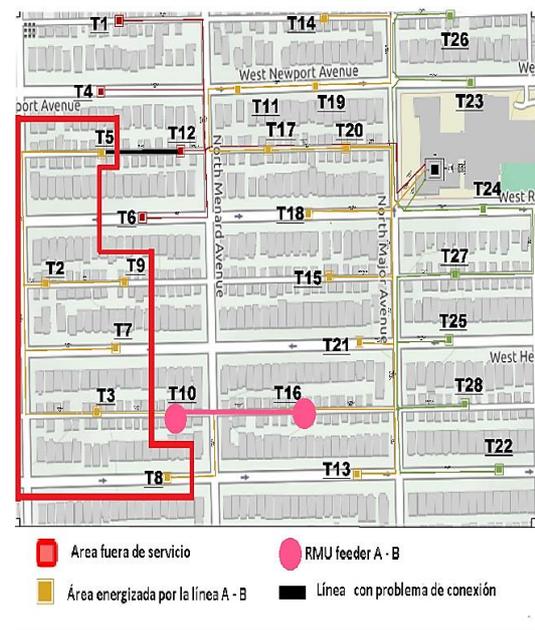


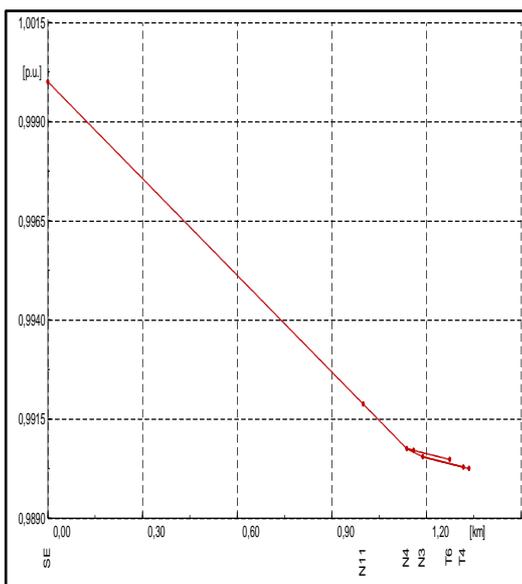
Figura 13. Reconfiguración del sistema de distribución por una falla

Como se puede observar en la Figura 13, ocurrió un evento en donde una línea del sistema quedó fuera de funcionamiento, para lograr reducir el tiempo de desconexión, se implementó el cierre de los RMU's, con ello se logra continuar con el suministro de energía, evitando daños o quejas por parte de los usuarios que utilizan el servicio, para ello, los equipos de conmutación van a permitir el paso de la energía por un tiempo establecido hasta que se logre realizar el mantenimiento de los equipos afectados durante la falla. A pesar de que los puntos para la interconexión entre primarios fueron diseñados para soportar cargas extras, las líneas y los

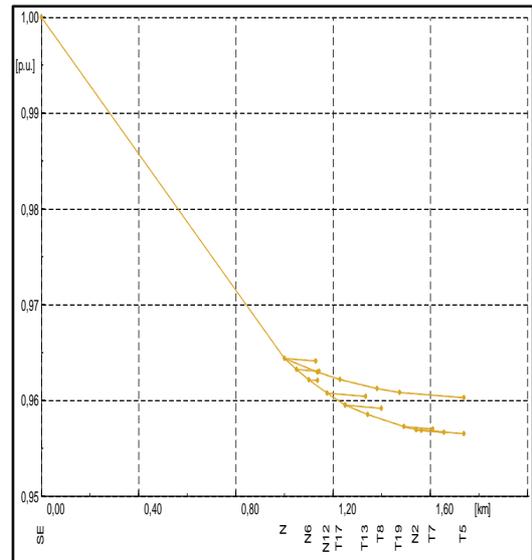
transformadores instalados con anterioridad en diferentes fases, van a tener una pequeña sobrecarga, por el incremento de carga inesperada, lo cual se puede mantener por un tiempo hasta que se repare el desperfecto, logrando que el sistema vuelva a tener un correcto funcionamiento.

Cabe recalcar que la reconfiguración realizada se lo hizo de forma manual, ya que el sistema no realiza el cierre o apertura de los RMU's de forma automática. Además, se debe tener en cuenta que el problema antes presentado es un ejemplo del comportamiento que poseen estos equipos al momento de una falla.

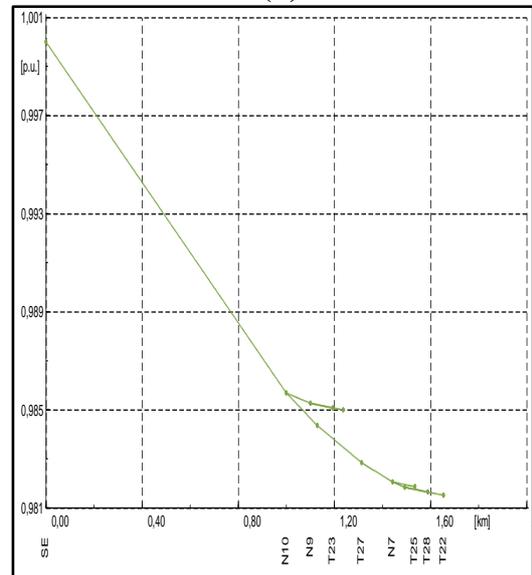
Al igual, para corroborar el buen funcionamiento del sistema durante un evento inesperado, se obtiene los perfiles de voltaje, que nos demuestran el incremento de carga a los demás sistemas que se encuentran en funcionamiento, logrando mantener los niveles de caída voltaje dentro del rango apropiado. Logrando demostrar que los elementos de conmutación (RMU), benefician apropiadamente a las redes de distribución soterradas, manteniendo el servicio activo y evitando la desconexión del sistema.



(a)



(b)



(c)

Figura 14. (a) Perfil de voltaje alimentador A después de una reconfiguración; (b) Perfil de voltaje alimentador B después de una reconfiguración; (c) Perfil de voltaje alimentador C después de una reconfiguración

Como se puede observar en la Figura 14, los perfiles de voltajes obtenidos demuestran el funcionamiento de la red durante condiciones anormales. De igual manera, se realiza el análisis para comprobar la caída de voltaje que existe en cada uno de los transformadores desplegados en el sistema, teniendo en cuenta la distancia entre el transformador y la subestación como se

muestra en la Figura 15, verificando que los niveles de caída de voltaje aumenten por las condiciones anormales del sistema, pero no sobrepasan los límites previamente expuestos.

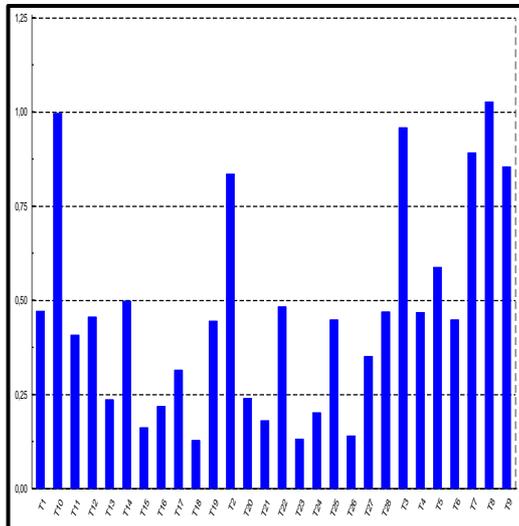


Figura 15. Caída de voltaje desde la subestación a cada transformador durante condiciones anormales (%)

5. Conclusiones

La presente investigación propone una metodología innovadora, que permite diseñar, planificar y ubicar elementos de conmutación (RMU) en una red distribución soterrada, teniendo en cuenta la información geográfica, minimizando los costos de construcción y el uso de los recursos.

El modelo nos brinda información georreferenciada acerca de las calles y viviendas, que servirán para calcular el despliegue de RMU's acorde a la cantidad de usuarios que sea necesario abastecer, teniendo en cuenta las distancias más apropiadas para su desarrollo.

Durante el despliegue de la red de medio voltaje, se han asignado puntos de conexión, que se encuentra ubicados de forma precisa, de acuerdo a las distancias mínimas entre primarios. Como resultado se han desplegado líneas de

conexión que se encargan de transmitir la energía eléctrica durante el cierre o apertura de los equipos de conmutación (RMU), mejorando los niveles de confiabilidad del sistema.

Se ha logrado alcanzar resultados satisfactorios asociados a la reducción del tiempo de desconexión del sistema, además, los límites permitidos de la caída de voltaje no son superados. Proporcionando una cobertura total dentro del área de concesión y manteniendo las seguridades deseadas.

6. Trabajos Futuros

Se sugiere la implementación de índices de calidad en el modelo planteado, permitiendo mejorar la calidad del servicio logrando una mayor eficiencia por parte de las redes de distribución soterradas y los elementos asociados al mismo.

Se recomienda la implementación de un sistema que realice la apertura o cierre de un equipo de conmutación de forma automática, logrando iniciar una investigación para la creación de redes eléctricas inteligentes.

7. Referencias

- [1] N. Alguacil, A. Delgadillo, and J. M. Arroyo, "A trilevel programming approach for electric grid defense planning," *Comput. Oper. Res.*, vol. 41, no. 1, pp. 282–290, 2014.
- [2] Y. Chen, S. Wang, J. Yu, W. Li, X. Shi, and W. Yang, "Optimal weighted voronoi diagram method of distribution network planning considering city planning coordination factors," *2017 4th Int. Conf. Syst. Informatics, ICSAI 2017*, vol. 2018–Janua, no. Icsai, pp. 335–340, 2018.

- [3] K. E. Antoniadou-Plytaria, N. C. Koutsoukis, E. S. Sergaki, and P. S. Georgilakis, "Multiyear power distribution planning considering voltage regulator placement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, p. 70 (6.)-70 (6.), 2017.
- [4] D. Deka, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Structure learning in power distribution networks," *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 1061–1074, 2018.
- [5] L. Kong, J. Xiao, H. Zhou, and B. Wang, "Planning method for distribution networks based on load growth characteristics of the industry," *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, vol. 2016–Septe, no. Ciced, pp. 1–5, 2016.
- [6] M. Galarza, D. Noboa, and I. J. Gallo, "Proyecto de Instalaciones Subterráneas de Media Tensión," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, p. 10, 2015.
- [7] Y. Xiang *et al.*, "Optimal Active Distribution Network Planning: A Review," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 44, no. 10, pp. 1075–1094, 2016.
- [8] S. Ganguly, N. C. Sahoo, and D. Das, "Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 65–78, 2013.
- [9] J. Fletcher, T. Fernando, H. Iu, M. Reynolds, and S. Fani, "A case study on optimizing an electrical distribution network using a genetic algorithm," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2015–Septe, pp. 20–25, 2015.
- [10] 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.
- [11] R. H. Fletcher and K. Strunz, "Optimal distribution system horizon planning - Part II: Application," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 862–870, 2007.
- [12] S. Yorukoglu, F. Nasibov, M. Mungan, and M. Bagriyanik, "The effect of the types of network topologies on nontechnical losses in secondary electricity distribution systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, pp. 3631–3643, 2016.
- [13] J. Li, X. Y. Ma, C. C. Liu, and K. P. Schneider, "Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 3021–3029, 2014.
- [14] J. Córdova, D. Merchán, and S. Torres, "Redesigning a retail distribution network in restricted urban areas: A case study on beverage distribution in the historic center of quito," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 850–859, 2014.
- [15] R. C. Lotero and J. Contreras, "Distribution system planning with reliability," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2552–2562, 2011.
- [16] A. Nagarajan and R. Ayyanar, "Application of Minimum Spanning Tree algorithm for network reduction of distribution systems," *2014 North Am. Power Symp. NAPS 2014*, no. 4, pp. 1–5, 2014.
- [17] 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.
- [18] J. Salehi and M. R. Haghifam, “Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 321–333, 2012.
- [19] A. Valenzuela, I. Montalvo, and C. B. Singaña, “Electrical vehicle: Facing future challenges in Quito,” *2017 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. - Lat. Am. ISGT Lat. Am. 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017.
- [20] N. Koutsoukis, P. Georgilakis, and N. Hatziargyriou, “Active distribution network planning based on a hybrid genetic algorithm-nonlinear programming method,” *CIREC - Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 2065–2068, 2017.
- [21] J. Wong, P. Baroutis, R. Chadha, R. Iravani, M. Graovac, and X. Wang, “A methodology for evaluation of permissible depth of penetration of distributed generation in urban distribution systems,” *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–8, 2008.
- [22] B. C. Neagu and G. Georgescu, “Wind farm cable route optimization using a simple approach,” *EPE 2014 - Proc. 2014 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, no. Epe, pp. 1004–1009, 2014.
- [23] A. H. A. Bakar, M. S. Ali, C. Tan, H. Mokhlis, H. Arof, and H. A. Illias, “High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 723–730, 2014.
- [24] S. F. Abdelsamad, W. G. Morsi, and T. S. Sidhu, “Optimal secondary distribution system design considering plug-in electric vehicles,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 266–276, 2016.
- [25] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, D. González-Montoya, C. A. Ramos-Paja, and A. Garces, “Linear power flow formulation for low-voltage DC power grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 163, no. July, pp. 375–381, 2018.
- [26] A. Valenzuela, E. Inga, and S. Simani, “Planning of a Resilient Underground Distribution Network Using Georeferenced Data,” *Energies*, vol. 12, no. 4, p. 644, 2019.
- [27] D. P. Montoya and J. M. Ramirez, “A minimal spanning tree algorithm for distribution networks configuration,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–7, 2012.
- [28] Y. Li and X. Chang, “A MST-based and new GA supported distribution network planning,” *Proc. 2011 Int. Conf. Mechatron. Sci. Electr. Eng. Comput. MEC 2011*, pp. 2534–2538, 2011.
- [29] G. A. Jimenez-Estevez, L. S. Vargas, and R. Palma-Behnke, “An evolutionary approach for the greenfield planning problem in distribution networks,” *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, pp. 1744–1749, 2007.
- [30] C. Barrera-Singana, A. Valenzuela, and M. P. Comech, “Dynamic control modelling of a bipole converter station in a multi-terminal HVDC grid,” *Proc. - 2017 Int. Conf. Inf. Syst.*

- Comput. Sci. INCISCOS 2017*, vol. 2017–Novem, pp. 146–151, 2018.
- [31] P. Cox, R. Fleming, F. Krajick, S. Boggs, and Y. Cao, “AC and impulse performance of medium voltage ethylene propylene-rubber cables with over 25 years of in-service aging in a wet underground environment,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 32, no. 3, pp. 24–28, 2016.
- [32] S. Chouhan, F. D. Mohammadi, A. Feliachi, J. M. Solanki, and M. A. Choudhry, “Hybrid MAS Fault Location, Isolation, and Restoration for smart distribution system with Microgrids,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2016–Novem, pp. 1–5, 2016.
- [33] M. Sedghi, M. Aliakbar-Golkar, and M. R. Haghifam, “Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 52, no. 1, pp. 221–230, 2013.
- [34] K. Isaksen and M. Stefanka, “Compact secondary substation in a future medium voltage distribution network,” *21 st Int. Conf. Electr. Distrib. Frankfurt*, no. 0405, pp. 6–9, 2011.
- [35] H. Max Bittel, A. T. D. Perera, D. Mauree, and J. L. Scartezzini, “Locating Multi Energy Systems for A Neighborhood in Geneva Using K-Means Clustering,” *Energy Procedia*, vol. 122, no. 2, pp. 169–174, 2017.
- [36] M. S. Nazar and M. R. Haghifam, “Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 6, pp. 899–911, 2009.
- [37] B. Canizes, J. Soares, S. Member, Z. Vale, S. Member, and C. Lobo, “Radial Distribution Networks,” *IEEE Syst. J.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2015.
- [38] J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. P. Saraiva Leão, and R. F. Sampaio, “Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 2, pp. 545–552, 2015.
- [39] V. Carnelossi Cunha and J. R. Sanches Mantovani, “Planning and Project of Medium Voltage Electric Power Distribution Systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2298–2308, 2016.
- [40] A. Samui, S. Singh, T. Ghose, and S. R. Samantaray, “A direct approach to optimal feeder routing for radial distribution system,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 1, pp. 253–260, 2012.
- [41] Z. hua Zhang, B. yin Xu, P. Crossley, and L. Li, “Positive-sequence-fault-component-based blocking pilot protection for closed-loop distribution network with underground cable,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 94, pp. 57–66, 2018.
- [42] Y. Cao, Y. Tan, C. Li, and C. Rehtanz, “Chance-constrained optimization-based unbalanced optimal power flow for radial distribution networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1855–1864, 2013.
- [43] J. H. Park, D. S. Lee, H. I. Yang, L. Yu, K. Y. Ahn, and Y. G. Kim, “A study on dynamic behavior of multibody dynamics model on ring main unit,”

- ICEPE-ST 2017 - 4th Int. Conf. Electr. Power Equipment-Switch. Technol.*, vol. 2017–Decem, pp. 760–762, 2017.
- [44] M. Tamboli and N. Chothani, “Relay coordination in smart distribution network using ring main units,” *2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput. ICECDS 2017*, pp. 692–697, 2018.
- [45] E. Morskieft and E. Jasperse, “Wireless remote control in ring main units: Experiences in intelligent grids,” *22 nd Int. Conf. Electr. Distrib. Pap.*, no. 0590, pp. 10–13, 2013.
- [46] P. Wagenaars, P. A. A. F. Wouters, P. C. J. M. Van Der Wielen, and E. F. Steennis, “Influence of ring main units and substations on online partial-discharge detection and location in medium-voltage cable networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 1064–1071, 2011.
- [47] D. Kumar and S. R. Samantaray, “Design of an advanced electric power distribution systems using seeker optimization algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 196–217, 2014.
- [48] N. C. Sahoo, S. Ganguly, and D. Das, “Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 3, pp. 15–32, 2012.
- [49] K. M. Muttaqi, A. D. T. Le, M. Negnevitsky, and G. Ledwich, “An algebraic approach for determination of DG parameters to support voltage profiles in radial distribution networks,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1351–1360, 2014.
- [50] S. Guan *et al.*, “Effect of grounded coating on insulation performance for solid insulation ring main unit,” *ICEPE-ST 2017 - 4th Int. Conf. Electr. Power Equipment-Switch. Technol.*, vol. 2017–Decem, pp. 740–743, 2017.

8. Estado del Arte

Tabla 5. Estado del Arte

UBICACIÓN ÓPTIMA DE RMU'S EN REDES ELÉCTRICAS SOTERRADAS DE DISTRIBUCIÓN RADIAL USANDO TÉCNICAS HEURÍSTICAS																									
ITEM	AÑO	DATOS	CITAS	TEMÁTICA						FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Teoría de grafos	Reducción de costos	Cobertura	Red de distribución soterrada	Capacidad	Ring Main Unit	Equipos de Conmutación	Enrutamiento	Creación de clusters	Capacidad	Capacidad	Tipo de topología de la red	Distancias mínimas	Teoría de grafos	Métodos Heurísticos	Árbol de mínima expansión	Distancias Mínimas	Cobertura	Capacidad	Despliegues de RMU's	Creación de enlaces	
1	2013	Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm	106	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒
2	2017	Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución	11	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☒
3	2017	Locating Multi Energy Systems for A Neighborhood in Geneva Using K-Means Clustering	5	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐
4	2012	A direct approach to optimal feeder routing for radial distribution system	50	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☒	☐	☒	☐
5	2016	Planning and Project of Medium Voltage Electric Power Distribution Systems	5	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒
6	2011	Distribution system planning with reliability	117	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒
7	2016	Planning method for distribution networks based on load growth characteristics of the industry	3	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒

8	2015	A case study on optimizing an electrical distribution network using a genetic algorithm	9	<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 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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	2007	An evolutionary approach for the greenfield planning problem in distribution networks	14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	2014	A trilevel programming approach for electric grid defense planning	89	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	2008	Genetic Algorithms and Voronoi Polygons applied to decision making in the Distribution Systems expansion problem	2	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" 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 type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	2014	Wind farm cable route optimization using a simple approach	7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" 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 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"/>
13	2014	Application of Minimum Spanning Tree algorithm for network reduction of distribution systems	14	<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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	2014	Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search	145	<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"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2012	A minimal spanning tree algorithm for distribution networks configuration	22	<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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" 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"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	2016	Optimal secondary distribution system design considering plug-in electric vehicles	10	<input type="checkbox"/>	<input 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"/>	<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"/>
17	2018	Positive-sequence-fault-component-based blocking pilot protection for closed-loop distribution network with underground cable	7	<input type="checkbox"/>	<input 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 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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	2014	High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms	45	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	2018	Linear power flow formulation for low-voltage DC power grids	9	<input checked="" 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"/>	<input checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	2012	Multi-objective planning of electrical distribution systems incorporating sectionalizing switches and tie-lines using particle swarm optimization	83	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<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 checked="" 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	2013	Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming.	76	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input 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 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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
22	2012	Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties	25	<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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 type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	2016	Hybrid MAS Fault Location, Isolation, and Restoration for smart distribution system with Microgrids	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" 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"/>	<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 checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	2008	A methodology for evaluation of permissible depth of penetration of distributed generation in urban distribution systems	14	<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 type="checkbox"/>	<input 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 type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25	2017	A study on dynamic behavior of multibody dynamics model on ring main unit	0	<input type="checkbox"/>	<input 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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"/>
26	2011	Influence of ring main units and substations on online partial-discharge detection and location in medium-voltage cable networks	20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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 checked="" type="checkbox"/>	<input 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 checked="" type="checkbox"/>
27	2013	WIRELESS REMOTE CONTROL IN RING MAIN UNITS : EXPERIENCES IN INTELLIGENT GRIDS	1	<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 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	2017	Effect of grounded coating on insulation performance for solid insulation ring main unit	0	<input type="checkbox"/>	<input 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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	2018	Relay coordination in smart distribution network using ring main units	0	<input type="checkbox"/>	<input 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 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"/>
30	2017	Active distribution network planning based on a hybrid genetic algorithm-nonlinear programming method	2	<input checked="" 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 type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" 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 type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	2007	Optimal distribution system horizon planning - Part II: Application	68	<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 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 checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

32	2007	Optimal distribution system horizon planning – part I: formulation	113	✗	✗	✗	✗	□	□	□	✗	✗	□	□	□	✗	✗	✗	✗	✗	□	□	□	□
33	2017	Multiyear power distribution planning considering voltage regulator placement	3	□	□	✗	□	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	✗	□	✗	□	✗	✗
34	2018	Structure learning in power distribution networks	24	✗	✗	□	□	✗	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	✗	✗	✗	✗	✗	□	□	□
35	2014	Design of an advanced electric power distribution systems using seeker optimization algorithm	23	✗	□	□	✗	✗	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	✗	□	✗	□	✗	□	□	□
36	2014	Redesigning a retail distribution network in restricted urban areas: A case study on beverage distribution in the historic center of quito	4	□	□	✗	□	✗	✗	✗	✗	□	✗	✗	✗	✗	□	□	□	✗	✗	✗	✗	✗
37	2009	Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept	75	□	✗	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	✗
38	2018	Optimal weighted voronoi diagram method of distribution network planning considering city planning coordination factors	7	✗	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	✗	✗	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	□	✗	✗
39	2016	AC and impulse performance of medium voltage ethylene propylene-rubber cables with over 25 years of in-service aging in a wet underground environment	3	□	□	✗	✗	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	✗	✗	□	□	□	✗	✗	✗	✗	✗
40	2015	Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks	42	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	✗	✗	✗
41	2014	An algebraic approach for determination of DG parameters to support voltage profiles in radial distribution networks	39	□	□	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	✗	✗
42	2015	Radial Distribution Networks	2	□	□	✗	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	✗
43	2016	The effect of the types of network topologies on nontechnical losses in secondary electricity distribution systems	5	□	□	✗	□	✗	□	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	□	✗	✗	✗
44	2013	Chance-constrained optimization-based unbalanced optimal power flow for radial distribution networks	66	□	□	✗	□	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	✗	✗	□	□	✗	□	□	✗	✗	✗
45	2011	COMPACT SECONDARY SUBSTATION IN A FUTURE MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK	5	□	✗	✗	□	□	✗	✗	□	□	✗	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	✗	✗	✗
46	2015	Proyecto de Instalaciones Subterráneas de Media Tensión	37	□	□	✗	✗	✗	□	□	□	□	✗	✗	✗	□	□	□	✗	□	□	✗	✗	✗
47	2017	Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm	12	□	□	□	□	✗	✗	✗	□	□	✗	✗	□	□	✗	□	✗	□	✗	✗	□	□
48	2018	Dynamic control modelling of a bipole converter station in a multi-terminal HVDC grid	1	□	✗	✗	□	✗	✗	□	□	□	✗	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗	✗	✗
49	2011	A MST-based and new GA supported distribution network planning	7	□	✗	✗	□	✗	✗	✗	✗	✗	□	✗	✗	✗	□	□	✗	□	✗	✗	✗	✗
50	2018	Optimal overhead distribution network planning based graph theory	0	✗	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	✗	✗	✗	□	□	□	✗	✗	✗
			CANTIDAD:	20	20	35	18	34	26	25	20	10	32	31	30	25	16	14	27	21	24	27	42	39

