

Planificación óptima de una red eléctrica de distribución considerando las condiciones técnicas de construcción y presupuesto.**Óptimal planning of an electrical distribution network considering the technical conditions of construction and budget**

Diego Armando Zapata Terán, Álvaro Santiago Mullo Quevedo, Edison Patricio Iza Toapanta, Daniel Carrion Espin.

**CONFLUENCIA DE
INNOVACIONES
CIENTÍFICAS**

Enero - junio, V°5-N°1; 2024

- ✓ **Recibido:** 28/03/2024
- ✓ **Aceptado:** 01/04/2024
- ✓ **Publicado:** 30/06/2024

PAIS

- Ecuador -Latacunga
- Ecuador -Latacunga
- Ecuador -Latacunga
- Ecuador -Latacunga

INSTITUCIÓN

- Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Universidad de las Fuerzas Armadas
- Universidad Técnica de Ambato
- Universidad Politécnica Salesiana

CORREO:

- ✉ diego.zapata1940@utc.edu.ec
- ✉ asmullo@espe.edu.ec
- ✉ edisoniza1993@gmail.com
- ✉ danicares@gmail.com

ORCID:

- <https://orcid.org/0009-0003-0954-7360>
- <https://orcid.org/0009-0008-0222-0791>
- <https://orcid.org/0009-0009-1902-9755>
- <https://orcid.org/0009-0008-0097-5357>

FORMATO DE CITA APA.

Zapata, D. Mullo, A. Iza, E. Espín, D. (2024). Planificación óptima de una red eléctrica de distribución considerando las condiciones técnicas de construcción y presupuesto. Revista G-ner@ndo, V°5 (N°1). 514-540.

Resumen

En la presente investigación se propone una metodología basada en la aplicación de un algoritmo genético de optimización (GOA). aplicado para el diseño óptimo de una red eléctrica de distribución en una zona urbana de Latacunga. Es necesario tener los puntos geo-referenciados de los usuarios. Para la localización del transformador en el lugar óptimo se debió considerar: el número de usuarios promedio que un transformador puede abastecer que por temas de diseño se consideró una restricción de un máximo de 90 usuarios en una distancia lineal máxima de 100 metros, estas consideraciones ayudan a seleccionar que tan óptimo es instalar un transformador trifásico o un monofásico dependiendo de la concentración de usuarios. El algoritmo propone un punto al azar y evalúa la cantidad de usuarios que se beneficiaran del transformador se efectúa una evaluación binaria que acepta o descarta la posición del transformador en una evaluación de 300 iteraciones. Los resultados obtenidos son la instalación óptima de siete transformadores cuatro de 100KVA y tres de 45 KVA con una cargabilidad entre el 60 al 80 % esto ayuda a la planificación y construcción de la red, se aplicó una validación en condiciones económicas que permite un ahorro del 20% con respecto a un diseño convencional, la red de media tensión mantiene una regulación en los parámetros técnicos del 5% de caída de voltaje.

Palabras clave: Optimización genética, Redes de Distribución, Georreferenciación, Optimización, Planificación.

Abstract

In this research, a methodology is proposed based on the application of a genetic optimization algorithm (GOA). applied for the optimum design of an electrical distribution network in an urban area of Latacunga. It is necessary to have the geo-referenced points of the users. To locate the transformer in the optimum location, the following should be considered: the average number of users that a transformer can supply. For design reasons, a restriction of a maximum of 90 users in a maximum linear distance of 100 meters was considered. These considerations help to select how optimum it is to install a three-phase or single-phase transformer depending on the concentration of users. The algorithm proposes a random point and evaluates the number of users who will benefit from the transformer. A binary evaluation is carried out that accepts or discards the position of the transformer in an evaluation of 300 iterations. The results obtained are the optimum installation of seven transformers, four of 100KVA and three of 45 KVA with a loadability between 60 to 80%, this helps the planning and construction of the network, a validation of the medium voltage network was applied to determine regulation and remains within the technical parameters, without the voltage regulation exceeding a 5% voltage drop.

Keywords: Genetic optimization algorithm, Distribution Networks, Georeferencing, Optimization, Planning.

Introducción

A nivel mundial existe un crecimiento industrial, urbanístico y tecnológico, que van de la mano con el aumento de la capacidad eléctrica ya que continuamente las empresas distribuidoras tienen requerimientos de nuevos usuarios por lo que obliga a que la expansión eléctrica planifique con herramientas más tecnológicas. Según ELEPCO S.A. en su informe de rendición de cuentas del 2022 posee una potencia instalada total de 302,01 MVA, que abastecen la demanda de 153.805 clientes (ELEPCO, 2022), así como también la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables mediante la regulación ARCERNNR 002/20 de “Calidad del Servicio de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica” Calidad del Servicio Técnico a nivel de red global, en donde se toma en cuenta las interrupciones a nivel de cabecera de alimentador, así como también las que se presenten a lo largo de las redes de MV por lo que el suministro de energía debe garantizar la calidad de servicio. (ARCERNNR, 2023).

Es de interés de las empresas distribuidoras generar políticas internas de expansión futura y controlada, las redes de distribución tienen un comportamiento dinámico en su funcionalidad ya que enfrenta desafíos como cargas desbalanceadas y variaciones en los flujos de potencia, por lo que su análisis de expansión es importante analizarlos mediante el uso de herramientas tecnológicas y matemáticas avanzadas de optimización, una red eléctrica de distribución debe tener la capacidad de soportar incrementos de potencia y demanda (Raut U, 2017) (Cadenovic R, 2018). Los métodos tradicionales para el diseño de las redes de distribución se basan en la experiencia y criterios técnicos del diseñador que se consideran la regulación de caídas de voltaje, cuando existen problemas de flujos de potencia, desbalance de las líneas, cargabilidad de las líneas se procede a analizar y realizar las correcciones pero no mediante una planificación sino en base a los problemas suscitados, los parámetros anteriormente

mencionados son de suma importancia considerarlos en el diseño u operación de todos los sistemas eléctricos de distribución (SED) (Müller UP, 2019).

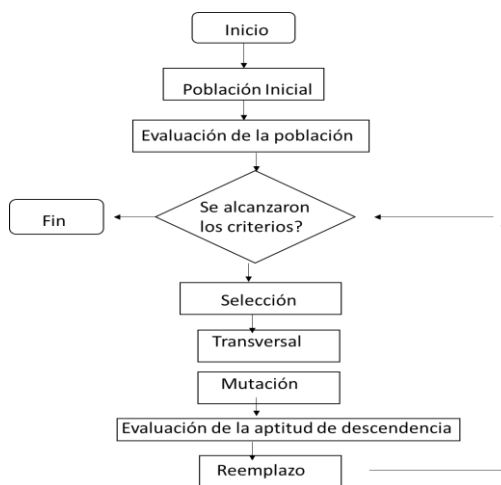
Materiales Y Métodos

Métodos de Optimización Genética (GOM)

Los GOM ayuda a la toma de decisiones de manera útil en varias etapas de los análisis, los modelos pueden ser simplificados que permiten evaluar múltiples variables y opciones en el diseño como por ejemplo el área de trabajo, la localización óptima de instalación de un transformador, dimensionamiento de la red, cantidad de usuarios, potencia máxima, etc. Y encontrar las soluciones óptimas que cumplan con uno o varios objetos de desempeño. Al realizar un modelo simplificado ayuda en la solución de los diseños eléctricos y recursos. Los algoritmos genéticos (GA) fueron usados dentro de problemas de optimización por John Holland en los años 70 (J. H. Holland, Julio 1992). En la era moderna los GA se han convertido en una herramienta estocástica inspirada en el análisis de la naturaleza de los objetos con un análisis de posibles soluciones matriciales. La GA sigue seis pasos que son inicialización, evaluación de aptitud, selección, cruce, mutación y reemplazo. Un valor puntual y se representa como un valor de secuencia de valores en dominio que tiene un valor exacto de tamaño y dimensión que se le asigna un valor real, binario o un dato codificado. En la figura 1 se puede apreciar un diagrama de flujo de la representación cromosómica de estudio de un GA. El GA estándar consta de seis pasos principales. Estos son inicialización, evaluación de aptitud, selección, cruce, mutación y reemplazo. Otro punto importante en GA es la representación de una solución potencial. Un cromosoma en GA se representa como una secuencia de valores en un dominio que tiene el número exacto de tamaño de dimensión que asigna una solución potencial al problema actual en cuestión. Los operadores de GA trabajan en esta representación. La representación de los datos depende principalmente del problema actual. Puede ser un número real, un número binario o un

dato codificado. La Tabla I demuestra la representación cromosómica de este estudio. El diagrama de flujo del GA estándar se muestra en la Fig. 1.

Fig. 1. Diagrama de flujo del GA [9]



Fuente. Mehtap Köse Ulukök, 2017

Formulación del problema

El desarrollo del presente trabajo de investigación; se basa en el rediseño óptimo de la red de medio voltaje y la ubicación óptima de los transformadores de distribución para la dotación de energía eléctrica a un conjunto de usuarios ubicados en el sector La Matriz en la ciudad de Latacunga. La base de datos de las coordenadas X, Y de cada uno de los usuarios, han sido obtenidas previamente en el desarrollo de un proyecto de sustitución de medidores eléctricos. El levantamiento de los Puntos georeferenciados se ha realizado mediante el Sistema de Posicionamiento Global GPS. De acuerdo con la base de datos de la Empresa Eléctrica Provincial ELEPCO SA; el conjunto de usuarios seleccionados para el rediseño de la red de medio voltaje son de tipo residencial, estratificada sectorialmente como usuarios tipo B, la cual cuenta con más de 350 lotes de terreno y 419 consumidores que requieren ser dotados de energía eléctrica.

Metodología

El desarrollo del Algoritmo de Optimización Heurístico y los procesos de operación se han realizado en el lenguaje de programación Python; en el Software Spyder entorno científico gratuito y de código abierto. Este lenguaje de programación está diseñado exclusivamente para ingenieros y analistas de datos. Su característica principal es la combinación de funciones avanzadas de edición, análisis y depuración para un desarrollo integral en la exploración de datos.

Etapas 1.- Consiste en el tratamiento y la exportación de la base de datos al entorno de desarrollo integrado Spyder para su correspondiente programación en lenguaje Python, Adicional, se grafica la ubicación de las coordenadas X, Y de los 419 usuarios que serán dotados de energía eléctrica.

Etapas 2.- Con el objetivo de determinar la ubicación óptima y minimizar el número de transformadores de distribución; se utiliza el método de optimización - Algoritmo Genético (AG), tomando como restricciones la capacidad y cobertura. Es decir, se determina la distancia óptima entre las cargas y el transformador de distribución a ser instalado.

Etapas 3.- Una vez obtenida la ubicación óptima de los transformadores de distribución y el número de usuarios beneficiados mediante el método de optimización (AG). La siguiente etapa consiste en la ubicación de diferentes puntos por todas las calles del sector con el objetivo de crear una posible malla de puntos donde se construirá la nueva red de medio de medio voltaje.

Etapas 4.- Para determinar la ruta óptima de la red medio voltaje; se utiliza el mismo método de optimización heurístico (AG); garantizando una topología radial que conecte todos los transformadores de distribución considerando la red del alimentador primario. La metodología de la ubicación óptima de los transformadores de distribución y la red óptima de medio voltaje se divide de manera general en dos partes. Mediante la implementación del método de optimización

(AG) se plantean funciones objetivo de minimización. Para el primer caso; el algoritmo tiene la capacidad de determinar la ubicación óptima y la menor cantidad de transformadores en base a la distancia entre los usuarios atendidos y el transformador, tomando en cuenta el número de usuarios para cada caso. La segunda parte de la metodología se resuelve mediante el mismo algoritmo de optimización; para este caso la función objetivo es determinar una topología óptima para la red de medio voltaje.

Método de Optimización (AG) – Ubicación óptima de los transformadores de distribución

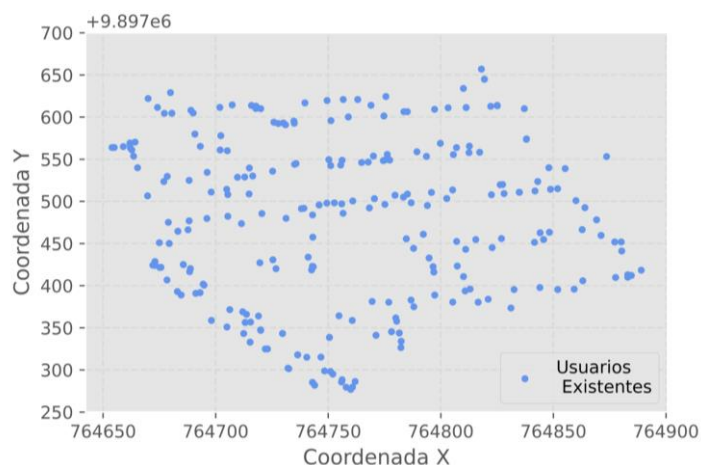
En esta etapa el algoritmo determina la ubicación óptima y el menor número de transformadores que se instalarán en este proyecto. Adicional, el algoritmo entrega las coordenadas georeferenciadas de cada uno de los transformadores que serán instalados. Resulta de gran importancia para los profesionales e ingenieros; realizar un óptimo dimensionamiento de la red de medio voltaje y la ubicación óptima de los transformadores durante la etapa de planificación y diseño. Tomando en cuenta esta premisa en la Tabla 1 se plantean las siguientes restricciones de capacidad y cobertura para el desarrollo del modelo de optimización.

Tabla 1. Restricciones Modelo Optimización

Restricciones	Datos
1	419 usuarios que serán dotados de energía
2	80 m de radio de cobertura por transformador
3	Capacidad de 90 usuarios por transformador
4	100% de cobertura

En el entorno e interprete integrado Spyder, mediante el lenguaje de programación Python se exporta una base de datos Excel de 419 usuarios con sus respectivos puntos georreferenciados obtenidas en un proyecto de sustitución de medidores eléctricos. En la figura 2 se observa la ubicación georreferenciada de los 419 usuarios que serán dotados de energía eléctrica.

Fig. 2 Ubicación geográfica de usuarios existentes.



Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

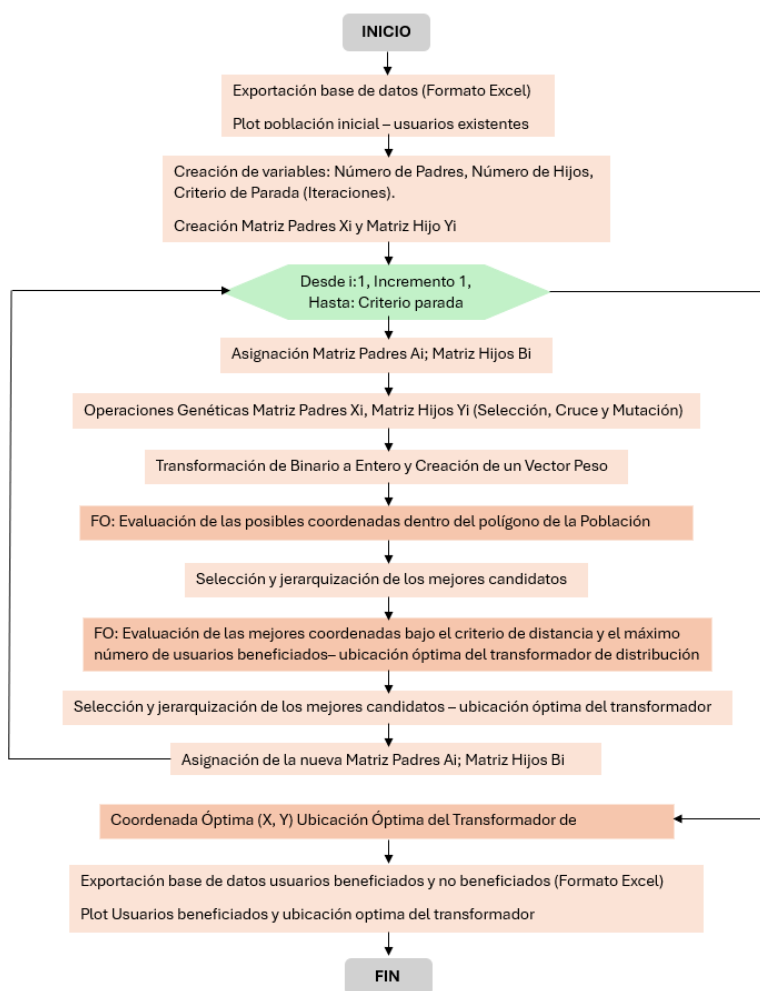
En la Figura 2, se muestra el diagrama de flujo correspondiente al pseudo código del modelo de optimización realizado mediante lenguaje de programación Python. Este modelo determina la ubicación óptima y el menor número de transformadores de distribución que serán instalados en este proyecto.

El sector donde se construirá la nueva red de medio voltaje es un sitio de estrato social medio; es decir, se ha considerado usuarios residenciales tipo B de acuerdo con la normativa de la Empresa Eléctrica Regional, para este caso ELEPCO SA.

El modelo de optimización (AG) inicia con la exportación de la base de datos en formato Excel; se construye una matriz denominada padres y una matriz denominada hijos; en este caso la matriz hijos es afectada por las diferentes operaciones genéticas programadas en lenguaje de operación Python. Una vez realizado el proceso genético, se transforma la matriz binaria a una

matriz de número enteros; ya que de esta manera se pueden obtener las coordenadas X, Y de las posibles ubicaciones de los transformadores de distribución. Las coordenadas X, Y son evaluadas en la función objetivo del modelo de optimización. Los criterios para la evaluación son: mínimo número de transformadores a instalarse, capacidad del transformador en base al máximo número de usuarios, distancia óptima desde el transformador a los consumidores. Es importante mencionar que en cada iteración se realiza una selección y jerarquización de los mejores candidatos (ubicación georeferencia del transformador de distribución).

Fig. 3 Diagrama de Flujo - Algoritmo Genético - Ubicación óptima del Transformador.



Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

Finalmente, el seudocódigo presenta la ubicación óptima georeferenciada de los transformadores a instalarse con sus respectivas coordenadas X, Y; además, simultáneamente el algoritmo de programación exporta una base de datos con el número de usuarios beneficiados para cada transformador. [11] [12]

Inicio del Programa – Determinación de la ubicación óptima del Transformador de distribución. Entrega las coordenadas de los puntos georeferenciados en los puntos óptimos [13] [14]

Etapas 1

- Exportación de la base de datos – Coordenadas de los Usuarios Existentes (X, Y) y creación de la matriz usuarios con sus respectivas coordenadas denominada $U_{(i,j)}$.

$$U_{(i,j)} = \begin{bmatrix} 746126 & 9897635 \\ \vdots & \vdots \\ 764025 & 9897401 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Inicio algoritmo genético (AG)

- Creación de dos matrices binarias aleatorias denominadas Matriz Padres y Matriz Hijos respectivamente.

$$P_{(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad H_{(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Etapas 2

- Creación de un criterio de parada (número de iteraciones) $[N = 300]$

- Ingreso del radio de cobertura del transformador de distribución

$$[D \leq 70 \text{ metros}]$$

Inicio proceso iterativo del algoritmo genético (AG)

FOR(k= 1, k++, N) (3)

- Asignación de las matrices aleatorias iniciales a nuevas matrices padres e hijos para el proceso iterativo.

$$M_P_{(i,j)} = P_{(i,j)}; \quad M_H_{(i,j)} = H_{(i,j)} \quad (4)$$

- Creación de una nueva matriz denominada matriz nuevos hijos. Esta matriz se obtiene de un proceso de operaciones genéticas entre padres e hijos para crear nuevos individuos (selección, mutación).

$$M_{P(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \leftarrow \text{Operaciones Genéticas} \rightarrow M_{H(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Resultado} \rightarrow M_NH_{(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

- Concatenación de las tres matrices creadas, para formar una súper matriz.

$$M_{(i,j)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

- Transformación de la super matriz binaria a una nueva matriz tipo entero (con esta matriz se obtiene las coordenadas (X, Y) de la posible ubicación del transformador de distribución.

$$C_{(i,j)} = \begin{bmatrix} 746969 & 9897567 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 764719 & 9897447 \end{bmatrix} \quad (7)$$

- Evaluación de cada una de las coordenadas (X, Y) de la matriz $C_{(i,j)}$ y $U_{(i,j)}$; para determinar la distancia del transformador de distribución y los usuarios existentes $U_{(i,j)}$; A continuación, se obtiene un vector de distancias denominado $Dx_{(i)}$

$$Dx_{(i)} = [100m, 120m, 40m, \dots, 70m] \quad (8)$$

- Concatenación del vector distancia $Dx_{(i)}$ y la *super matriz* $C_{(i,j)}$ obteniendo la matriz $DC_{(i,j)}$; esta matriz pasa por un proceso de evaluación en base a los criterios de la función objetivo $D \leq 70 \text{ metros}$ y *Número de beneficiarios*.

- Una vez que la matriz $DC_{(i,j)}$ es jerarquizada de mayor a menor, se procede a separar esta matriz en los nuevos padres e hijos para la próxima iteración.

$$M_H_{(i,j)} = H_{(i,j)}$$

Fin Proceso iterativo FOR

Etapas 3 Una vez terminado el proceso iterativo, se obtiene la coordenada de la ubicación óptima del Transformador de distribución para cierto número de beneficiarios.

$$T1_{(i,j)} = [Coordenada X, Coordenada Y]$$

- Exportación de la base de datos (Usuarios Beneficiados) y (Usuarios No Beneficiados).

Fin del Programa – Determinación de la ubicación óptima del Transformador de distribución.

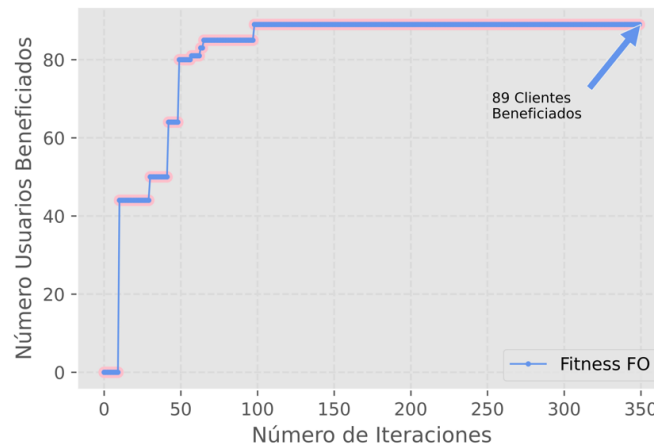
Desarrollo

Ubicación Óptima – Primer transformador de distribución T1

Para la solución del modelo de optimización (AG) se toma como población inicial a los 419 usuarios que serán dotados de energía eléctrica. Una vez realizado los procesos de

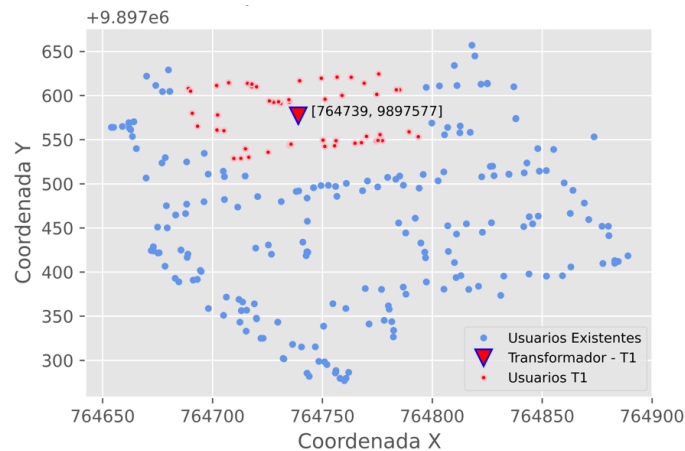
iteraciones y cálculos correspondientes; en la figura 4 se puede observar el comportamiento de la Función Objetivo (FO), mostrando como resultado el mayor número de usuarios beneficiados de acuerdo con la ubicación óptima del primer transformador.

Fig. 4 Comportamiento Función Objetivo - Usuarios Beneficiados Transformador T1



Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

Fig. 5 Usuarios Beneficiados - Transformador T1



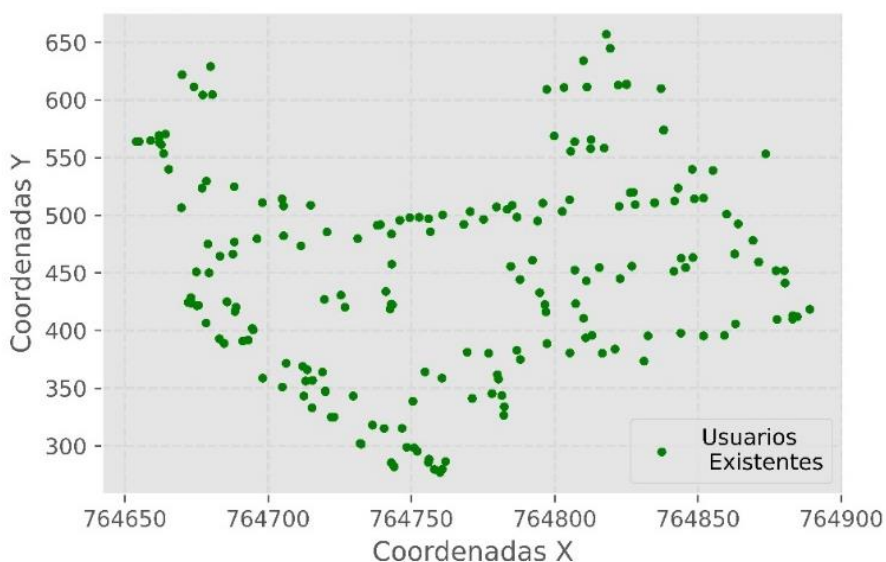
Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

Para tener una mejor apreciación de los resultados; la Figura 5 muestra la ubicación óptima del primer transformador con sus respectivas coordenadas X, Y. Adicional, los puntos de color rojo representan los usuarios beneficiados por el transformador de distribución T1.

Ubicación Óptima – Segundo transformador de distribución T2

Para determinar la ubicación óptima del segundo transformador de distribución T2; se realiza el mismo procedimiento anterior. Tomando en cuenta que la nueva población inicial ya no contiene a los 89 usuarios del transformador T1, en la Figura 5 se puede observar la nueva población que se empleará para determinar la ubicación del segundo transformador.

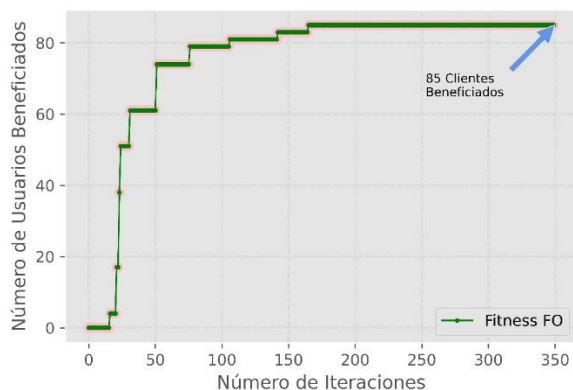
Fig. 6 Población inicial para determinar la ubicación del transformador T2



Fuente: Zapata D, Mullo A.

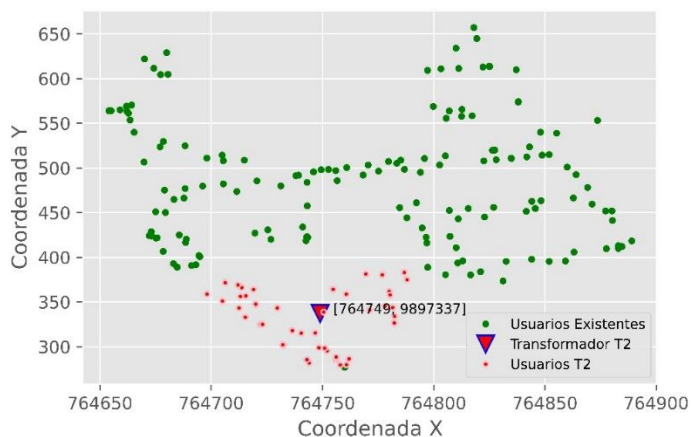
En la Figura 7 y 8 se puede verificar el comportamiento de la función objetivo y la ubicación óptima del segundo transformador con sus respectivas coordenadas X, Y. Adicional, los puntos de color rojo representan los usuarios beneficiados por el transformador de distribución T2.

Fig. 7 Comportamiento Función Objetivo – Usuarios Beneficiados Transformador T2



Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

Fig. 8 Usuarios Beneficiados - Transformador T2



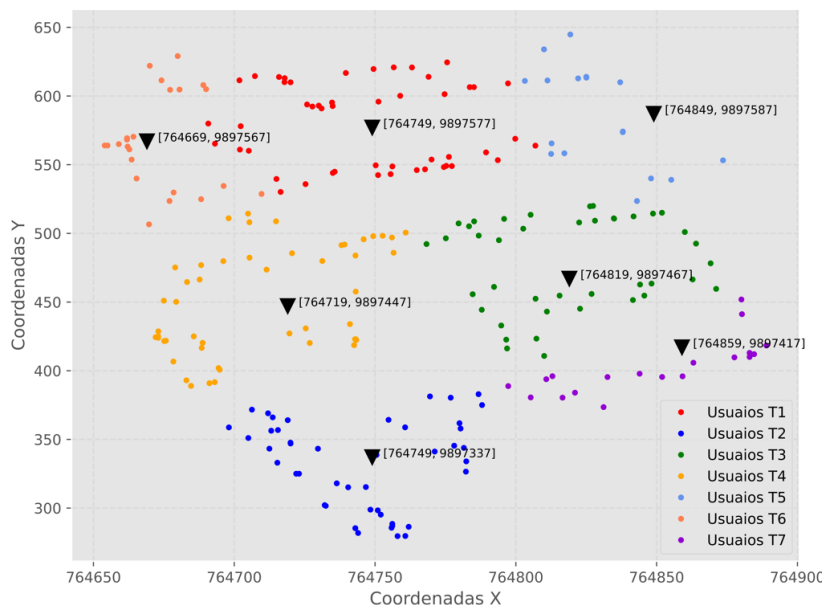
Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

Es importante recalcar, que se repite el mismo proceso mencionado en los anteriores párrafos hasta cubrir el 100% de la población inicial. Es decir, hasta tener una cobertura total de los 419 usuarios que serán dotados de energía eléctrica.

La figura 9 muestra la ubicación óptima de los transformadores de distribución que serán instalados en el sector La Matriz en la ciudad de Latacunga; la ubicación óptima de los

transformadores ha sido determinada mediante el modelo de optimización – algoritmo genético basados en los criterios y restricciones mencionados en este trabajo de investigación.

Fig. 9 Ubicación Óptima - Transformadores de Distribución

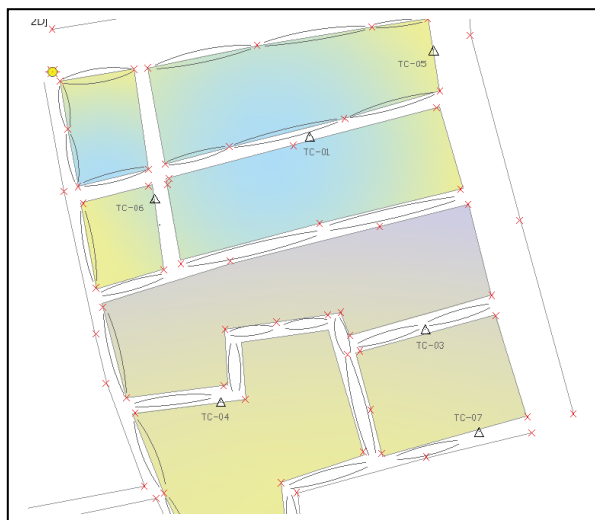


Fuente: Zapata D, Mullo A, Iza Edison, Carrión D.

Construcción óptima de la red de media tensión

El modelo desarrollado para determinar la ubicación óptima de los transformadores ayuda para desarrollar la extensión de red óptima considerando las coordenadas de la ubicación de los transformadores, ubicación de los postes, vértices y camino de las calles, así como punto de arranque es la ubicación de la red troncal que sirve de alimentador primario, para lo cual se inicia realizando una malla de las rutas y calles por donde podría ser construida la red para que el algoritmo decida cuál sería la ruta óptima. En la figura 10 se muestra la malla con la ruta que se puede generar dependiendo del criterio personal ya el algoritmo en la evaluación generara la ruta óptima para la construcción de la red de medio voltaje. La red de medio voltaje inicia desde el poste existente que se muestra en la figura 10, el optimizador generara posibles rutas de construcción de la red de M.V. Y dependerá de la evaluación técnica y económica para validar el resultado de la red propuesta.

Fig. 10 Malla de ruta viable de construcción de red de m.v.



△ Transformador proyectado X Vértices ____ Perfil viable de red

☀ Poste existente

Figura 11. Algoritmo para la creación de los puntos geo-referenciados

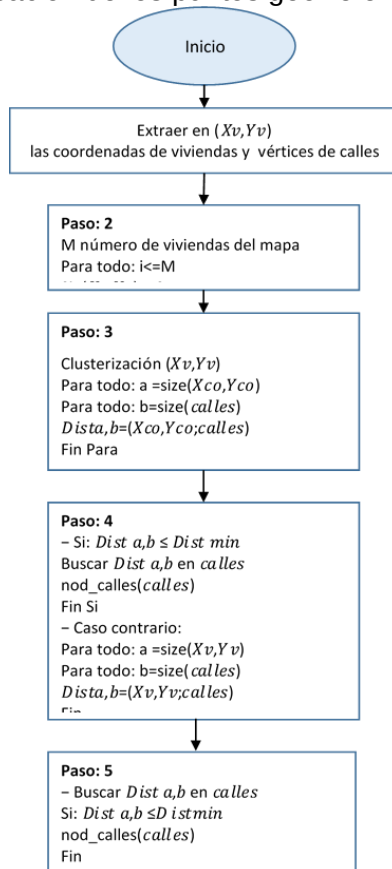
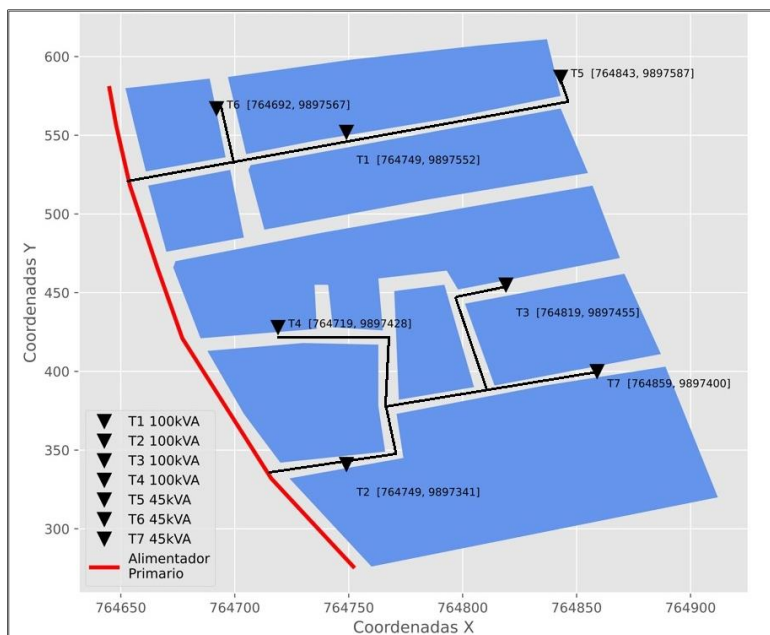


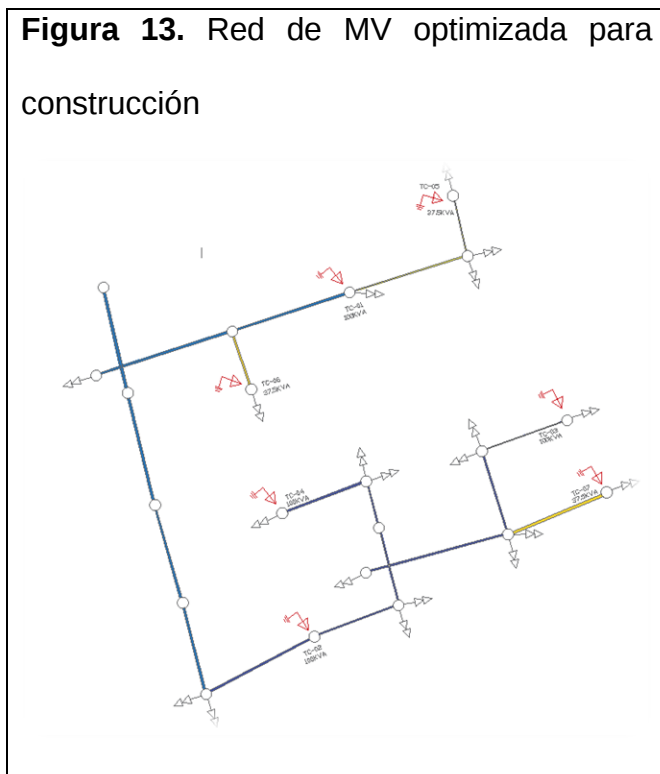
Figura 12. Ruta óptima de medio voltaje

El diagrama de flujo del seudo código considerado en la figura 11 está ejecutado por una impresión de rutas basados en teoría de grafos que determina la ruta más corta y óptima para la construcción una vez que los transformadores ya han sido determinado tanto en posición como en posible potencia que va a satisfacer a los usuarios, Al generar la ruta corta, minimiza los costos de construcción que va de la mano con la importancia de conocer la caída de tensión. El diseño obtenido se considera una instalación propuesta de siete transformadores instalados bajo una configuración radial, el mismo que se construirá con un alimentador trifásico con cable ASCR 3/0 con un nivel de voltaje establecido por ELEPCO de 13.8KV y también poseen tres ramales monofásicos de 7.9 KV con conductor ASCR 1/0.

De acuerdo a las restricciones y consideraciones de los algoritmos se genera la topología con un recorrido óptimo de la red de medio voltaje, el recorrido lo realiza por las calles definidas en los vértices de las veredas y postes posibles, partiendo del poste existente hacia cada uno de los postes. El resultado gráfico se muestra en la figura 12.

De acuerdo a la figura 10 que es el resultado de la red óptima, se establece que desde el poste inicial se estima una construcción de 432 metros red trifásica y tres ramales monofásicos con una distancia de 100 metros, la instalación de siete transformadores definidos en cuatro transformadores trifásicos de 100KVA y tres monofásicos de 45 KVA, postes, tensores de medio voltaje que de acuerdo a la cotización con valores de mercado de mano de obra y materiales generado en el programa AS400 para presupuestos de la empresa eléctrica ELEPCO que se estima un costo de \$ 61.941,83.

Figura 13. Red de MV optimizada para construcción



Resultados y discusión

En la Tabla 2, se muestra un resumen del número de transformadores a instalarse en el proyecto. Además, se indica las coordenadas geo-referencias (X, Y) y el número de beneficiados de cada transformador de distribución.

Tabla 2 Resumen ubicación óptima Transformadores de Distribución

Ítem	Descripción	Coordenadas		Número de Beneficiarios
		X	Y	
1	Transformador T1	764749	9897417	86
2	Transformador T2	764749	9897567	85
3	Transformador T3	464819	9897587	77
4	Transformador T4	764719	9897447	70
5	Transformador T5	764849	9897467	29
6	Transformador T6	764669	9897337	28
7	Transformador T7	764859	9897577	26

De acuerdo con los resultados obtenidos por el algoritmo de optimización (AG), en la Tabla 3 se puede encontrar la demanda por transformador (Demanda Diversificada); con estos datos se puede realizar un diseño de la potencia de cada transformador a instalarse en este proyecto.

Tabla 3 Demandas Diversificadas - Redes Aéreas

Clientes	Demanda en kW para un usuario con Consumo A de (500kWh)	Demanda en kW para un usuario con Consumo B de (270kWh)	Demanda en kW para un usuario con Consumo C de (160kWh)	Demanda en kW para un usuario con Consumo D de (110kWh)	Demanda en kW para un usuario con Consumo E de (80kWh)
	A	B	C	D	E
#	500	270	160	110	80
1	6.611	3.832	2.412	1.731	1.306
2	8.594	4.982	3.135	2.25	1.698
3	11.305	6.553	4.124	2.96	2.223
4	13.222	7.664	4.823	3.462	2.612
5	16.127	9.348	5.883	4.223	3.186
6	18.154	10.523	6.623	4.754	3.586
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
26	49.123	28.474	19.92	12.863	9.704
27	50.584	29.321	18.453	13.245	9.992
28	52.045	30.168	8.986	13.628	10.281
29	53.504	31.014	19.518	14.01	10.569
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
70	1113.053	65.531	41.242	29.602	22.332
77	123.205	71.416	44.945	32.26	24.337
85	134.806	78.141	49.177	35.298	26.629
86	136.256	78.981	49.706	35.678	26.915

Fuente: Normas para el diseño de redes de distribución.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los usuarios beneficiados de cada transformador con su respectiva potencia de acuerdo con la tabla diversificada de demandas.

Tabla 4 : Resumen Potencia de cada transformador de acuerdo con el número de usuarios.

Ítem	Descripción	Número de Beneficiados	Demanda (kW)	Transformador (kVA)	Carga (%)
1	Transformador T1	86	78.981	100	78.98
2	Transformador T2	85	78.141	100	78.14
3	Transformador T3	77	71.416	100	71.42
4	Transformador T4	70	65.531	100	65.53
5	Transformador T5	29	31.014	45	68.92
6	Transformador T6	28	30.168	45	67.04
7	Transformador T7	26	28.474	45	63.28

Análisis Económico

Para ejecutar una validación económica se toma en consideración un análisis comparativo entre un diseño clásico basado en el criterio empírico del ingeniero diseñador cuyo análisis considera 1.302 metros de conductor 3/0 para alimentación trifásica y 408 metros de red monofásica de 1/0 que alimentara 9 transformadores 3 monofásicos y 6 trifásicos que de acuerdo al análisis económico con el programa AS400 de la empresa eléctrica ELEPCO pretende generar una inversión de \$75,156.99. Con la metodología propuesta se reduce tanto la red trifásica la red monofásica y a 7 transformadores esto es una reducción económica el \$13.215,16 esto es un 17,58%.

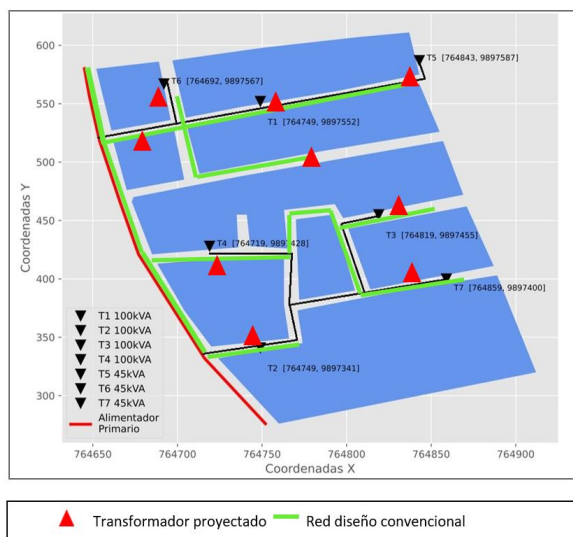
Tabla 5 Análisis comparativo entre un diseño convencional empírico y la metodología propuesta.

Parámetros	Longitud Total en (m)	Presupuesto de Construcción	Numero transformadores
Diseño optimizado	1196 (3/0) 390 (1/0)	\$61.941,83	7
Diseño convencional	1.302 (3/0) 408 (1/0)	\$75,156.99	9

En la figura 14 se aprecia una comparación gráfica entre un diseño basado en el criterio técnico empírico y un aplicando optimización en las distancias, considerando las coordenadas fijas como la instalación de los transformadores y distancias máximas de los conductores de bajo

voltaje para que no exista una caída de voltaje fuera de los límites de diseño. En un análisis tanto de la tabla 5 como en la figura 14 se aprecia que con respecto a la distancia de conductores existe una diferencia mínima la diferencia se destaca en la cantidad y potencia de los transformadores.

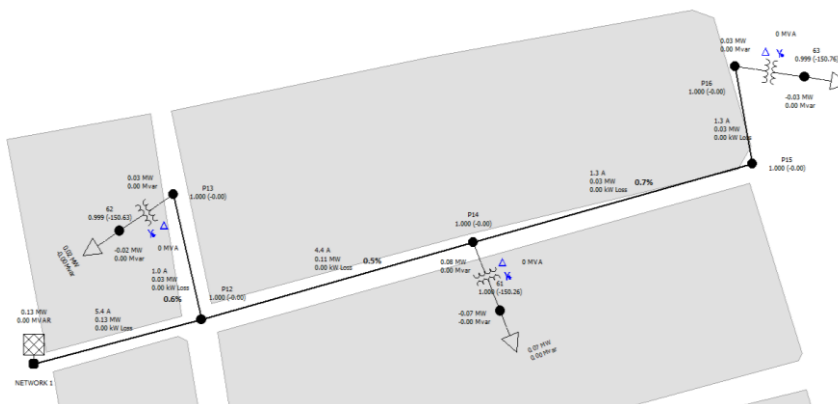
Figura 14. Comparación grafica de un diseño convencional y una red aplicando optimización.



Análisis técnico

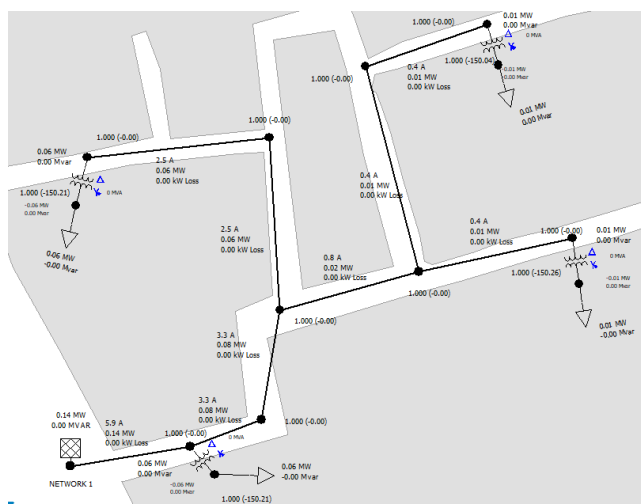
Para la ejecución de la viabilidad técnica se procede a analizar la cargabilidad de los transformadores y la regulación de voltaje mediante CYMDIS en las líneas considerando los usuarios y con los conductores antes mencionados de 3/0 ASCR y 1/0 ASCR. En el primer ramal analizado de la Av. Juan de Velasco mantiene una cargabilidad de 0.13MW con un consumo de 5.4A que se encuentra dentro de las condiciones técnicas con una regulación de voltaje que no superan el 1%, encontrándose dentro de la normativa. Cabe destacar que mediante un diseño convencional para la aprobación de un proyecto no se consideran los parámetros como cargabilidad y flujos de potencia, como se aprecia en la figura 16.

Figura 15. Perfil de carga en la línea de distribución y el porcentaje de regulación.



En el análisis del segundo ramal de la misma forma los parámetros de cargabilidad de los transformadores se hallan máximo hasta un 80% que se encuentran dentro de las condiciones técnicas de funcionalidad y con una regulación de voltaje máximo de 1.4% como se puede apreciar en la figura.

16. **Figura 16.** Perfil de carga en la línea de distribución y el porcentaje de regulación del ramal.



Conclusiones

Se estableció una metodología mediante la aplicación de un algoritmo genético (G.A.), que ayuda al diseño de las redes eléctricas de distribución partiendo desde un universo de 419 clientes, para la localización óptima del transformador se considera un área de cobertura de 100 metros y el número de clientes de 90, esto ayuda a planificar el tipo de transformador a instalar ya sea trifásico o monofásico.

Se determinó que es óptimo el diseño de la red con siete transformadores, cuatro transformadores de 100KVA y tres transformadores de 45KVA, que se encuentran con una cargabilidad entre el 60 al 80% y una regulación de voltaje que no supera el 1.4%.

La metodología desarrollada ayuda a la planificación óptima de la expansión y construcción de la red de medio voltaje cuya función objetivo aplica al camino óptimo de la red que de acuerdo al análisis económico permite un ahorro presupuestario del 17.58% frente a un diseño convencional basado en criterios técnicos empíricos.

Recomendaciones

Establecer un análisis comparativo entre dos o más modelos de optimización que ayuden a establecer una metodología más completa y que aporte de mejor forma al diseño óptimo de redes de distribución. Realizar un análisis de flujos de potencia para partir desde las condiciones dinámicas del sistema eléctrico de distribución con algún software Power Factory, Cymdist; otros. Estos estudios ayudaran de mejor forma a la construcción, planeación, expansión y contingencias al momento de estudiar la red.

Referencias bibliográficas

- ELEPCO, «Rendicion_cuentas,» 2022. [En línea]. Available: <https://elepcosa.com.ec/wp-content/uploads/2023/04/Informe-Rendicion-de-Cuentas-2022-ELEPCOSA>. [Último acceso: 8 1 2024].
- ARCONEL, «Vvlner,» 2019. [En línea]. Available: <https://vvalner.com/normatividad-ecuador/>. [Último acceso: 8 5 2024].
- U. Raut y Mishra, «IEEE,» 3 12 2017. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8280684/authors#authors>. [Último acceso: 7 5 2023].
- D. J. Rade Cadenovic y J. V. Petar Sarajcevy, «MDPI,» 5 11 2018. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1278>. [Último acceso: 10 10 2023].
- M. Ulf Philipp, S. Birgit, S. Malta, B. Wolf Dieter, S. Gunther, J. Bartels y . P. Guido, «MDPI,» 11 12 2019. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2091>. [Último acceso: 7 9 2023].
- J. Holanda, «JSTOR,» 1992. [En línea]. Available: <https://www.jstor.org/stable/24939139>. [Último acceso: 4 2 2024].
- R. Capelini, G. Ferraz, R. Salustiano, E. Neto, M. Pereira, M. Oliveira, A. Oliveira y R. Testi , «IEEE,» 22 09 2016. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7800880>. [Último acceso: 5 5 2023].
- H. Chunguang, Z. J. Ming, D. Xin, W. Lei, Z. Guangxin, X. Xiaolin, L. Peng y L. Yong, «IEEE,» 27 3 2017. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8054316/authors#authors>. [Último acceso: 12 10 2023].
-

- [M. K. Ulukök, «semanticsholar,» 1 9 2017. [En línea]. Available: <https://www.semanticsholar.org/paper/Impact-of-genetic-algorithm's-parameters-on-of-Uluk%C3%B6k/9f2f09551e46d6104e38303916c9a3e9d6ac228a>. [Último acceso: 17 8 2023].
- A. K. Kiefner, «Sciencedirect,» 11 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167637716301481>. [Último acceso: 8 3 2024].
- D. Dorado, J. Cidras y E. Míguez, «IEEE,» 7 2002. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4312408>. [Último acceso: 6 2 2024].
- J. Naor, D. Panigrahi y M. Singh, «IEEE,» 25 10 2011. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6108170/>. [Último acceso: 4 1 2024].
- E. Inga, M. Campaña y R. Hincapié, «IEEE,» 18 5 2018. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8484859>. [Último acceso: 5 2 2024].
- A. Peralta, E. Inga y R. Hincapié, «IEE,» 12 2017. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8204507>. [Último acceso: 12 3 2024].
- Y. Chen, S. Wang, J. Yu, W. G. Li y X. Shi, «IEEE,» 13 11 2017. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8248314>. [Último acceso: 15 4 2024].
-