

Planificación de Redes Eléctricas de Distribución en Zonas Urbanas Consolidadas Considerando Criterios de Confiabilidad

C. Solís, *Magister en Ingeniería Eléctrica, EEASA*, H. Arcos, *Doctor en Ingeniería Eléctrica, EPN*

Resumen—Se propone una metodología de planificación de redes eléctricas de distribución subterráneas en zonas urbanas consolidadas, la cual se centra en la determinación de las variables dependientes: ubicación óptima de los centros de transformación MV/BV y configuración óptima tipo “anillo abierto” de la red de media tensión que los alimenta, fundamentados en criterios de confiabilidad y empleando como variables independientes la ubicación geográfica de la fuente (subestación de distribución o punto de arranque del alimentador primario), el recorrido de las calles o vías públicas en el plano georreferenciado y las coordenadas geográficas de los usuarios finales del sistema eléctrico, así como las cargas asociadas a estos últimos; información que reside en la base de datos del sistema de información geográfica (SIG) de las empresas de distribución eléctrica ecuatorianas. La propuesta contempla el uso de varios algoritmos metaheurísticos, de optimización con teoría de grafos y de clustering. El proceso de optimización toma en cuenta el cumplimiento de límites para caídas de voltaje en circuitos de baja tensión, mejora de índices de confiabilidad del servicio y el dimensionamiento de los transformadores MV/BV en base al método de la REA, implementándose la metodología propuesta mediante un programa computacional desarrollado en lenguaje m. de Matlab®. Finalmente, se realiza la aplicación práctica de la propuesta de planificación en una zona urbana consolidada de la ciudad de Ambato.

Palabras clave—Planificación, Distribución, Confiabilidad, Soterramiento, Algoritmos, Metaheurísticas, Urbano.

I. INTRODUCCIÓN

La red de distribución constituye el eslabón final en la cadena de suministro eléctrico, es la parte más dispersa y extendida, que debido a su complejidad y exposición, es también la más frágil y que mayor incidencia presenta en la calidad del servicio eléctrico al usuario final. Se puede decir que la imagen de todo el sector eléctrico[1], depende en gran medida del cumplimiento de los parámetros de calidad del servicio y del producto eléctrico del sistema de distribución.

Debido a su topología eminentemente radial, ha sido el sector más descuidado en el ámbito técnico. La necesidad de una correcta planificación, como paso previo al diseño y construcción, se torna más crítica en el caso de los sistemas de distribución subterráneos, en vista que estas redes no pueden ser modificadas en su tiempo de vida útil que normalmente se extiende a lapsos extensos, mayores incluso a los 25 años de depreciación que consta en libros contables[2].

Adicionalmente se debe mencionar que los criterios de confiabilidad, tan importantes en la actualidad debido al carácter crítico del servicio eléctrico en el mundo de hoy, no

han estado presentes en la etapa de planificación de los sistemas de distribución, menos aún en el diseño final de los mismos[3].

La metodología de planificación aquí descrita aborda esta problemática, constituyéndose en una herramienta que genera un importante insumo para la elaboración del diseño final y posterior ejecución de proyectos de soterramiento eléctrico.

Por lo expuesto se desarrolla un modelo de optimización de costos de inversión, operación y mantenimiento considerando criterios de confiabilidad; de tal manera que permita obtener la ubicación de los transformadores de distribución y la ruta del circuito primario que los alimenta, en un sector urbano consolidado donde se haya considerado la migración del servicio eléctrico de redes aéreas a subterráneas; se dispone como variables de entrada a la ubicación de la fuente (subestación de distribución o punto de arranque del alimentador primario), el recorrido de las calles o vías públicas y las coordenadas geográficas de los usuarios finales del sistema eléctrico, así como las cargas asociadas a estos últimos; los cuales se obtienen de la base de datos del Sistema de Información Geográfica (SIG), que reside en las empresas distribuidoras del Ecuador.

El problema de optimización de la ubicación de los transformadores presenta como restricciones tanto a la caída de voltaje admisible de la red secundaria asociada a cada centro de transformación MV/BV así como su posición final, la cual debe estar situada en espacios públicos tales como vías o calles, para evitar el ingresar con la redes propuestas por espacios privados o accidentes geográficos.

Para la determinación de la trayectoria óptima de la red primaria la restricción corresponde al recorrido de las calles de la zona de estudio. Se considera que el modelo de planificación es semi-estático, es decir que no presenta un incremento o variación de la demanda eléctrica en el plano horizontal, teniendo únicamente una tasa de crecimiento de la carga de tipo vertical. Para la resolución de los problemas de optimización se emplean varias herramientas de inteligencia artificial con la finalidad de realizar su implementación computacional y aplicación práctica.[4]

Se puede destacar que a nivel internacional han sido presentadas varias propuestas de planificación de sistemas de distribución utilizando técnicas de optimización, así tenemos tanto en [5] como [6] desarrollos que incorporan estas herramientas y que están orientadas al manejo de grandes sistemas de distribución. Específicamente en [5] utiliza el algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization) para el problema de optimización en el enrutamiento de alimentadores

II. MARCO TEÓRICO

primarios y el algoritmo AIS (Artificial Immune Systems) para la ubicación de la compensación reactiva del sistema de distribución en tanto que en [6] se emplea el algoritmo MNB (Meshed Network Building) para determinar las rutas malladas en función de minimizar la longitud y la inversión requerida en la red primaria.

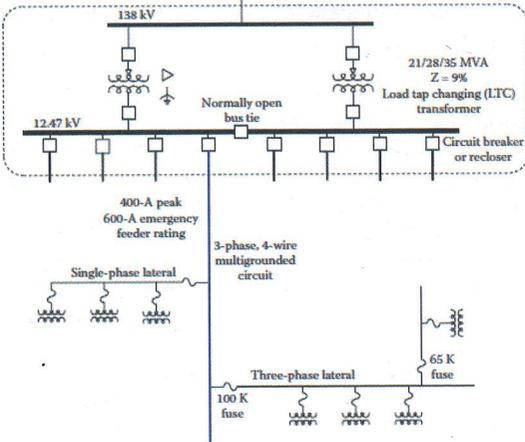


Fig. 1. Configuración Radial

En nuestra región también se han presentado algunos estudios en esta línea investigativa como en [7] y [8]. En el caso de [7] utiliza el algoritmo k-means para la ubicación de transformadores de distribución y la técnica de árboles mínimos de Steiner para obtener la configuración óptima radial del alimentador primario, en tanto que en [8] igualmente utiliza el algoritmo k-means para la ubicación de transformadores y técnicas de árbol mínimo Dijkstra y Prim para el recorrido radial de la alimentación primaria. Es importante mencionar que el presente trabajo se diferencia de los descritos por incorporar criterios de confiabilidad en el proceso de optimización y generar una configuración del alimentador en medio voltaje del tipo anillo abierto, aplicable a sistemas de distribución reales.

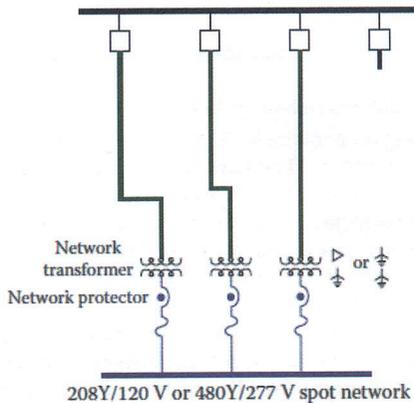


Fig. 2. Configuración Spot Network

A. Topología de los sistemas eléctricos de distribución

Los sistemas eléctricos subterráneos se implementan normalmente en zonas urbanas con un alto nivel de consolidación o en lugares en los cuales se requiera, por consideraciones de tipo estético, despejar el ambiente visual de cables aéreos, los cuales por su propia naturaleza no son agradables a la vista.

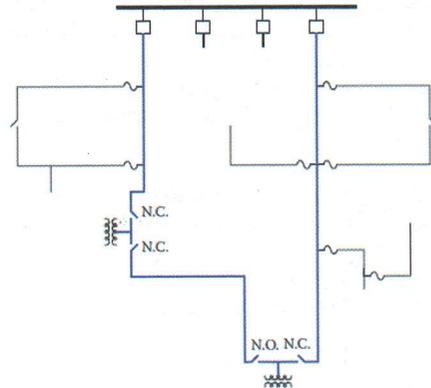


Fig. 3. Configuración Anillo Abierto

De acuerdo al grado de confiabilidad que se requiera y a la densidad de carga existente en el área a intervenir se determina la configuración de la red primaria bajo la cual se aprovisionará del servicio eléctrico en una zona definida. En nuestro país tradicionalmente se ha venido utilizando para redes subterráneas la configuración tipo radial (Figura 1.), siguiendo un símil a lo que se emplea en redes aéreas, debido especialmente a lo intuitivo de la operación y coordinación de protecciones, a pesar de su baja confiabilidad.

En la segunda década del siglo veinte en los Estados Unidos, por los graves problemas de calidad del servicio que se ocasionaba en las áreas metropolitanas debido a la baja confiabilidad de las redes subterráneas, se diseñó un esquema en la alimentación en media tensión altamente redundante y con un sistema mallado en baja tensión. Esta configuración es muy empleada en las áreas comerciales de las grandes ciudades donde existe una alta concentración de carga y se requiere de muy elevados niveles de confiabilidad. A este tipo de sistema se lo conoce como "spot network" y es ampliamente utilizado a pesar de la complejidad que se presentan en la operación y en la coordinación de las protecciones eléctricas. Esta configuración se muestra en la Figura 2.

Un tercer tipo de configuración empleado es el que se conoce como "open loop", anillo o lazo abierto (Figura 3.). Se trata de un sistema que posee doble conexión hacia la fuente, la cual dibuja un esquema que permite solventar las averías ocasionadas en alguno de los tramos del circuito primario, aislando la falla y alimentando, de ser requerido, desde otro punto; reduciendo ostensiblemente el tiempo de reparación y por lo tanto mejorando los índices de confiabilidad. Este esquema se convierte en un estado intermedio entre el circuito radial y la configuración spot network, puesto que dispone de

una doble alimentación y a su vez es operado como un sistema radial facilitando de esta manera la operación y la coordinación de protecciones.[9] Siendo este el esquema que más se adapta a la realidad económica y de desarrollo de los sistemas de distribución eléctrica subterránea de nuestro país.

B. Indicadores de confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución.

En el IEEE Standard 1366, Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices 2003 se desarrolló una serie de indicadores que permiten describir la confiabilidad en las redes eléctricas de distribución.

Los índices que se evalúan en el presente trabajo y permiten realizar un análisis comparativo de la metodología propuesta son los siguientes:

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} = \frac{\sum \text{Total de consumidores afectados}}{\text{Total de consumidores servidos}} \quad (1)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} = \frac{\sum \text{Dur. de las interrup. de cada cons.}}{\text{Total de consumidores servidos}} \quad (2)$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3)$$

$$ASAI = \frac{\sum (N_i \times 8760) - \sum U_i N_i}{\sum (N_i \times 8760)} \quad (4)$$

$$ENS = \sum C_m \times U_i \quad (5)$$

C. Herramientas de inteligencia artificial

Para la implementación computacional de la metodología de planificación desarrollada se emplearon los siguientes algoritmos de Inteligencia Artificial en la resolución de los varios problemas de optimización presentes y que fueron adaptados de acuerdo a las necesidades de cada una de las etapas a resolver:

1) Algoritmo Genético (AG)

Los AG's son técnicas heurísticas de búsqueda globales, aleatorias basadas en la mecánica de la selección natural y en la genética natural. Fueron desarrollados por Holland en 1975 en su trabajo "Adaptation in Natural and Artificial Systems", para identificar múltiples soluciones óptimas a problemas difíciles tales como funciones de optimización.

En un AG, las soluciones representadas por estructuras de datos llamadas individuos son evolucionadas y una nueva población de individuos es creada. A cada individuo se le asigna un valor o aptitud mediante el cual se compara con otros individuos de la misma población. Los algoritmos genéticos han sido desarrollados para resolver problemas lineales y no lineales, explorando todas las regiones del espacio de búsqueda a través de la mutación, cruzamiento y la selección de operaciones aplicadas a los individuos en una población. En el proceso del desarrollo del algoritmo, las poblaciones con mejores soluciones evolucionan hasta que se satisface un criterio de terminación.[10].

El algoritmo genético básico es el siguiente:

1. Se genera aleatoriamente una población inicial.
2. Se calcula la aptitud de cada individuo.
3. Selección (probabilísticamente) basándose en la aptitud.
4. Aplicación de operadores genéticos (cruza y mutación) para generar la siguiente población.
5. Se repite el proceso hasta que cierta condición se cumpla

2) Algoritmo K-Medoids

El Algoritmo K-Medoids, corresponde a un tipo de método de agrupamiento (clustering), que se deriva del Algoritmo K-Means que fue propuesto en 1987 y actualizado en 1990 como algoritmo PAM (Partitioning Around Medoids). Este método basa su agrupamiento en función de encontrar el costo mínimo entre una observación (coordenadas) con cada uno de los medoids previamente determinados. Es un método heurístico, que no necesariamente encuentra la solución óptima global [11].

El algoritmo PAM trabaja de la siguiente manera:

1. Inicialización: Se selecciona la ubicación de los k medoids de los n puntos de la observación.
2. Se determina el costo de cada n punto a cada uno de los k medoids. (distancia de los puntos a sus medoids).
3. Se asocia cada punto al medoid más cercano (menor costo).
4. Se determina el costo total (suma de la distancia de los puntos a sus medoids).
5. Mientras el costo de la configuración disminuye:
 - Para cada medoid m, para cada no medoid o:
 - 1. Intercambiar m y o, recalculando el costo.
 - 2. Determinar la nueva ubicación de los medoids
 - 3. Si el costo total de la configuración aumentó en el paso anterior deshacer el intercambio.
6. Fin: El algoritmo termina cuando no se consigue reducir el costo total con el intercambio de los medoids.

3) Algoritmo Dijkstra

Este algoritmo fue propuesto por Edsger Wybe Dijkstra en el año de 1959 y permite obtener la ruta óptima o de mínimo costo entre dos puntos y desarrollar el árbol de longitud total mínima, en grafos en los cuales las trayectorias tienen un peso positivo[12].

El algoritmo Dijkstra trabaja de la siguiente manera:

"En un grafo dirigido ponderado de N nodos no aislados, sea x el nodo inicial, un vector D de tamaño N guardará al final del algoritmo las distancias desde x al resto de los nodos.

1. Se inicializa todas las distancias en D con un valor infinito relativo ya que son desconocidas al principio, exceptuando la de x que se debe colocar en 0 debido a que la distancia de x a x sería 0.
2. Sea a = x (se toma "a" como nodo actual).
3. Se recorre todos los nodos adyacentes de a, excepto los nodos marcados, llamando a estos nodos no marcados vi.

4. Si la distancia desde x hasta v_i guardada en D es mayor que la distancia desde x hasta a, sumada a la distancia desde a hasta v_i ; esta se sustituye con la segunda nombrada, esto es: si ($D_i > D_a + d(a, v_i)$) entonces $D_i = D_a + d(a, v_i)$.
5. Se marca como completo el nodo "a".
6. Se toma como próximo nodo actual el de menor valor en D (puede hacerse almacenando los valores en una lista de prioridad) y se vuelve al paso 3 mientras existan nodos no marcados.

Una vez terminado al algoritmo, D estará completamente lleno.[13]

4) Optimización por Colonia de Hormigas (Ant Colony Optimization)

Este algoritmo está basado en el comportamiento de las hormigas cuando están forrajeando, es decir cuando las hormigas buscan su alimento y retornan a su colonia luego de que lo han encontrado.

“Las hormigas exploran por diferentes caminos aleatorios en busca de su alimento, el momento que alguna encuentra una fuente de alimento, regresa a su colonia dejando un rastro de feromonas que se disipa con el tiempo, el cual es percibido por otras hormigas las cuales siguen por este camino. Si es que alguna otra hormiga ha encontrado una ruta más corta regresará en un menor tiempo por esta nueva vía, permitiendo que las feromonas se disipen en menor cantidad, esto indica a las otras hormigas que este nuevo camino es el más óptimo, haciendo que ellas prefieran recorrer esta nueva ruta. Al haber mayor cantidad de hormigas por esta ruta, se refuerza el rastro de feromonas llegando a un punto en que todas las hormigas preferirán recorrer únicamente este camino.”

Este algoritmo fue desarrollado en 1997 como una mejora del algoritmo de Sistema de Hormiga presentado en 1996 por Dorigo[14].

El pseudo-código de esta meta-heurística es el siguiente:

1. Establecer la feromona inicial ();
 2. Mientras (el criterio de término no esté satisfecho)
 - a. Crear las hormigas de una colonia ();
 - b. Para (cada hormiga de la colonia);
 - {Mover hormiga ()} hasta completar ruta;
 - Mover hormiga ()
 - Para (todo el vecindario factible)
 - Calcular probabilidades de movimiento;
$$P_{ij}(t) = \frac{(\tau_{ij})^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} (\tau_{il})^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}, \text{ si } j \in N_i^k$$
 - Fin para
 - Nodo seleccionado = seleccionar el movimiento ()
 - Fin para
 - c. Actualizar feromona
 - d. Destruir hormigas
 - Fin mientras
 3. Si se cumple criterio, entonces terminar.
- Típicamente el criterio de parada está dado por el número de colonias a evaluar, esto es por el número de veces que se repite el paso 2[15].

III. METODOLOGÍA DE PLANIFICACIÓN PROPUESTA

La metodología de planificación desarrollada plantea la optimización en cuatro etapas secuenciales (figura 4), donde los resultados que entrega cada una de ellas se convierten en los parámetros de entrada de la siguiente etapa, siendo estas:

- Determinación del número de centros de transformación;
- Ubicación de los centros de transformación;
- Determinación de la distancia mínima entre centros de transformación, y;
- Selección de la ruta óptima del alimentador primario en configuración lazo abierto.

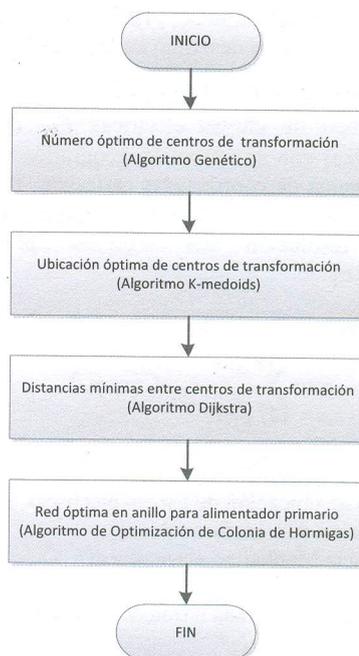


Fig. 4. Diagrama de flujo de la metodología propuesta

A. Determinación del número de centros de transformación

Para la resolución de este problema se plantea un modelo de optimización no lineal cuya función objetivo en su forma más general es:

Función Objetivo:

$$\min \sum_{j=1}^k C_{invj} + \sum_{j=1}^k \frac{C_{pj}}{(1+i)^t} + \sum_{j=1}^k \frac{C_{mj}}{(1+i)^t} + \frac{C_{ens_{tr}}}{(1+i)^t}$$

• Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\frac{S * l}{V_{nom}} (R \cos \phi + X \sin \phi) \leq \Delta V_{max}$$

$$\forall k \in \{N^+\}$$

Dónde:
 C_{invj} , costo de inversión por transformador
 C_{pj} , costo por pérdidas de energía

de la ciudad de Ambato, conocida como *Ficoa*.

A. Aplicación en sector *Ficoa*

Este sector está servido actualmente por el Alimentador Primario *Ficoa* y del cual se requirió la información de las cargas que conforman el área de estudio. Esta zona se encuentra situada en el perímetro conformado por las calles: Rodrigo Pachano, La Delicia, Los Guaytambos, Las Mandarinas, las Limas y Los Toctes. La red eléctrica de distribución es de tipo aérea, y toma su energía desde la subestación *Atocha*.

El área de soterramiento comprende una superficie de 0,754 km² y 2151 usuarios con un consumo promedio de 191 kWh/mes. Esta información así como la ubicación de las cargas y las coordenadas geográficas de las calles han sido obtenidas de la base de datos del Sistema de Información

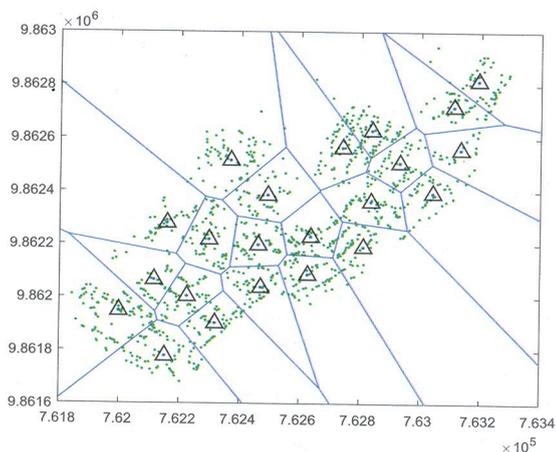


Fig. 5. Ubicación geográfica de transformadores y cargas

Geográfica (SIG) de la Empresa Eléctrica Ambato RCN S.A.

Para la modelación de la red secundaria de bajo voltaje se emplearon los parámetros descritos en la Tabla I., los cuales corresponden a un cable tipo TTU de cobre, aislamiento a 2 kV, calibre 250 kcmil cuyos valores han sido tomados de [19].

Tabla I: PARÁMETROS DE LA RED SECUNDARIA

Voltaje (kV)	Resistencia conductor (ohm/km)	Reactancia conductor (ohm/km)	Factor potencia (fp)	ΔV (%)
0,220	0,160	0,090	0,90	3,50

Los parámetros financieros de entrada para la función objetivo se presentan en las Tablas II y III.

Tabla II: PARÁMETROS FINANCIEROS DE ENTRADA EN FUNCIÓN OBJETIVO

Costo de Inversión (US\$)	Costo O&M (US\$)	Costo de ENS (cUS\$)	Costo de Energía (cUS\$/kWh)
10.000,00	150,00	153,30	8,00

Los datos de entrada de los parámetros de confiabilidad se muestran en la Tabla IV.

Tabla III: OTROS PARÁMETROS FINANCIEROS DE ENTRADA EN FUNCIÓN OBJETIVO

Tasa de descuento (%)	Tiempo de vida útil (años)	Tasa de crecimiento de la carga (%)
3,00	25,00	1,50

Tabla IV: PARÁMETROS DE ENTRADA DE CONFIABILIDAD

Tasa de falla de transformador (veces/año)	Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)	Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)
0,01	0.0435	6,5

Los resultados obtenidos por la ejecución de la subrutina que determina el número óptimo de centros de transformación se presentan en las Tablas V y VI.

Tabla V: DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO DE TRANSFORMADORES USANDO ALGORITMO GENÉTICO

	Unidades	Cantidad
Número óptimo de transformadores	cantidad	22
Costo óptimo total de transformadores	US\$	789.239,57
Costo total de inversión	US\$	220.000,00
Costo total de pérdidas de energía	US\$	511.606,16
Costo total de mantenimiento	US\$	57.463,39
Costo total de ENS	US\$	3.740,33

Tabla VI: UBICACIÓN ÓPTIMA DE TRANSFORMADORES USANDO ALGORITMO K-MEDIODS

No.	Consumo (kWh)	Usuarios (Cantidad)	Potencia (kVA)	Coord. Eje X	Coord. Eje Y
1	21519	106	114	761999	9861947
2	30019	106	114	762836	9862360
3	21783	117	125	762470	9862036
4	11713	70	78	762115	9862064
5	33542	121	129	762636	9862227
6	14878	86	94	762931	9862506
7	25115	140	148	762152	9861777
8	13978	92	100	762461	9862196
9	24479	102	110	763192	9862815
10	18495	103	111	762626	9862084
11	26338	114	122	762318	9861901
12	9703	39	47	763133	9862556
13	16132	97	105	762298	9862216
14	13143	80	88	763041	9862392
15	18578	116	124	762811	9862188
16	13658	85	93	762492	9862384
17	15655	104	112	762368	9862515
18	6343	50	58	762158	9862278
19	17357	101	109	762741	9862563
20	20195	120	128	762225	9862002
21	21378	77	85	763110	9862717
22	17782	125	133	762838	9862628

En la Figura 5. se presenta el resultado gráfico de la ubicación de los centros de transformación y el diagrama de Voronoi de su área de servicio.

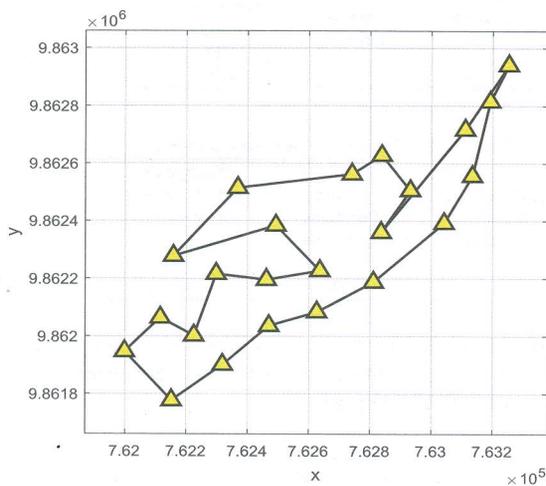


Fig. 6. Topología de la red propuesta

En las Tablas VII y VIII se presentan los resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas en la determinación de la ruta óptima en anillo abierto.

En la Figura 6, se presenta la topología de la red propuesta por la metodología desarrollada.

Finalmente en las Figuras 7 y 8, se representa la ubicación geográfica de la ruta óptima tanto en el gráfico que entrega el programa desarrollado en MATLAB®, como en la base geográfica en ARCGIS®.

B. Análisis comparativo de resultados

Para la cuantificación de la mejora de la confiabilidad se realizó el análisis comparativo con la red existente del alimentador *Ficoa* que sirve a la zona de estudio. Este primario es de tipo aéreo, consta de 62 centros de transformación y toma su energía desde la subestación Atocha, a un nivel de voltaje de 13,8 kV.

Para este análisis comparativo se realizó la simulación de la confiabilidad entre el alimentador aéreo actualmente en servicio y el de tipo subterráneo propuesto por la metodología desarrollada en la presente investigación, utilizándose para ello el *módulo de confiabilidad* del software CYMDIST®.

TABLE VII
RUTA ÓPTIMA DE ALIMENTADOR PRIMARIO USANDO ALGORITMO OPTIMIZACIÓN COLONIA DE HORMIGAS

Iteración	Tasa falla mínima total (veces/año)	Distancia (m)
100	0,3084	7090

TABLE VIII
RUTA ÓPTIMA DE ALIMENTADOR PRIMARIO USANDO ALGORITMO OPTIMIZACIÓN COLONIA DE HORMIGAS

Ruta (nodos)	Tasa falla mínima (veces/año)	Distancia (m)
184 13 87 26 188	0,0119650	275
188 26 27 50 204	0,0082380	189
204 120 83 201	0,0069126	159
201 65 66 79 69 63 64 126 199	0,0195710	450
199 126 64 63 151 61 164 200	0,0221900	510
200 164 61 45 95 198	0,0208290	479
198 95 187	0,0094939	218
187 95 45 106 190	0,0141210	325
190 106 105 71 44 195	0,0164610	378
195 44 71 32 202	0,0125920	289
202 62 186	0,0063157	145
186 130 5 142 183	0,0108300	249
183 101 11 119 189	0,0133250	306
189 30 12 31 67 193	0,0112660	259
193 67 33 92 185	0,0105240	242
185 136 54 86 192	0,0089767	206
192 125 7 8 197	0,0119260	274
197 8 158 196	0,0212450	488
196 29 194	0,0132820	305
194 29 133 144 128 191	0,0177900	409
191 21	0,0060732	140
21 191 128 203	0,0118000	271
203 109 108 26 87 13 184	0,0226710	521

* El alimentador existente está representado en la Figura 9, en el modelo realizado en CYMDIST®.

Los parámetros de entrada de confiabilidad de la simulación en CYMDIST® para la red aérea de tipo radial que actualmente está en operación se presentan en la Tabla IX y han sido tomados de valores típicos para zonas urbanas que constan en la referencia [17].

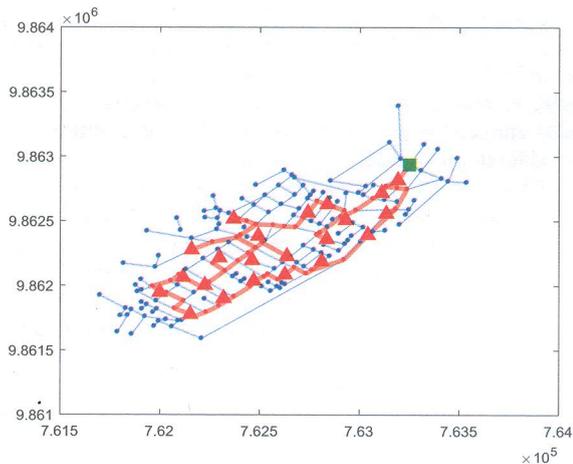


Fig. 7. Ubicación geográfica de la ruta óptima del alimentador MATLAB®

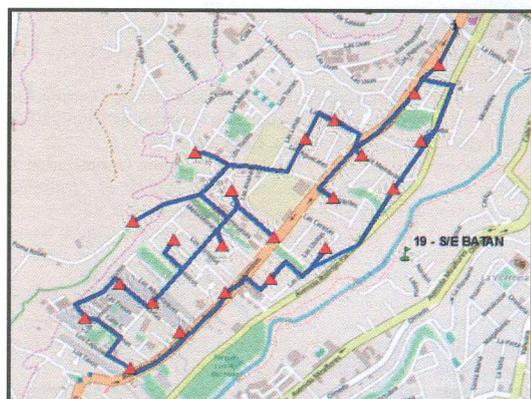


Fig. 8. Ubicación geográfica de la ruta óptima del alimentador ARCGIS®

PARÁMETROS DE ENTRADA DE CONFIABILIDAD EN RED AÉREA RADIAL EXISTENTE

Tasa de falla de transformador (veces/año)	Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)	Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)	Tiempo de reparación por red primaria MTTR (horas)
0,01	0.063	4,0	4,0

Se consideró que el tiempo de reparación del primario aéreo radial es de 4,0 horas, puesto que se trata en este caso de una red que no permite una reconfiguración o mallado desde otro punto de alimentación.

Los parámetros de entrada de la simulación en CYMDIST® para el alimentador subterráneo en lazo abierto propuesto, se presentan en la Tabla X y han sido tomados de la referencia [1].

Se estimó que el tiempo de reparación del primario sea de 1,5 horas, puesto que el primario presenta una topología en lazo abierto (open loop) que permite una alimentación alternativa en caso de falla de alguno de los tramos del cable subterráneo; configuración que admite, luego de ser identificado el punto averiado, aislar el tramo fallado de una manera relativamente rápida y alimentar nuevamente el primario desde el otro ramal del lazo, reduciendo ostensiblemente los tiempos de recuperación del servicio eléctrico.

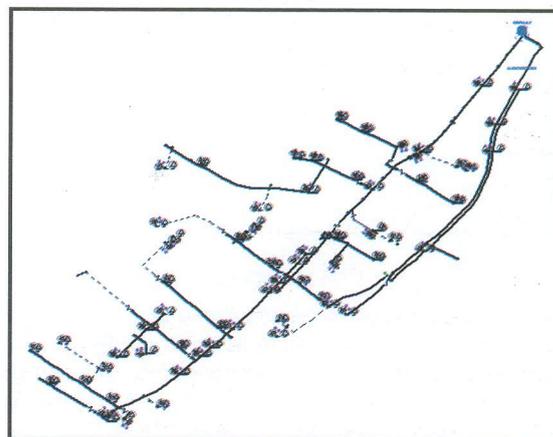


Fig. 9. Representación del alimentador Ficoa existente CYMDIST®

Los resultados obtenidos de la simulación en CYMDIST® para el primario existente y el primario subterráneo propuesto se presentan en la Tabla XI.

De la comparación de los resultados presentados en las simulaciones realizadas en el programa CYMDIST® y que constan en la Tabla XI., se evidencia que todos los índices de confiabilidad mejoran al planificar una red subterránea con la metodología propuesta, especialmente el SAIFI y SAIDI. La ENS disminuye en un 52,40% es decir a un poco más de la mitad de la red aérea actual, con el consiguiente ahorro económico en el tiempo.

PARÁMETROS DE ENTRADA DE CONFIABILIDAD EN RED SUBTERRÁNEA PROPUESTA

Tasa de falla de transformador (veces/año)	Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)	Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)	Tiempo de reparación por red primaria MTTR (horas)
0,01	0.063	4,0	4,0

También se determina una reducción en la longitud del primario en 1,82 km, lo cual influye en la disminución de la tasa de fallas total del conductor y además se reduce la cantidad de centros de transformación en 40 unidades basado en el cálculo del costo óptimo total considerando la inversión inicial, pérdidas de energía y confiabilidad de estos equipos.

· TABLA XI
ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS SECTOR FICOA

Índices calculados	Primario aéreo existente	Primario subterr. propuesto	Variación (unidad)	Variación (%)
Saifi (int/cns-año)	0,160	0,090	0,90	3,50
Saidi (h/cns-año)	6,4053	1,5834	4,8219	75,28
Caidi (h/cns-inter)	3,887	3,0322	0,8548	21,99
Asai	0,99927	0,99982	-0,00055	-0,06
ENS (kWh/año)	7 068,5	3 364,8	3 703,7	52,40
Cens 25 años (US \$)	188 689,05	89 821,17	98 867,88	52,40
ENS media (kWh/cns-año)	3,26341	1,56429	1,69912	52,07
Longitud red (km)	8,75	6,95	1,80	20,57
Cantidad transformador	62	22	40	64,62

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo se enfocó en desarrollar una metodología que permite realizar la planificación de redes de distribución subterránea en zonas urbanas consolidadas cuando esta se trata del tipo *Greenfield Planning*, es decir cuando se conoce la ubicación y consumo de los usuarios finales, y las coordenadas geográficas de las calles situadas en el área de estudio. Información de la que se dispone en las bases de datos de los sistemas de información georreferenciados (SIG) de las empresas de distribución del país.

Esta metodología contempla el uso de varias herramientas de Inteligencia Artificial, que a pesar de que no aseguran la convergencia hacia una solución global, sin embargo permiten obtener una solución local que alcanza en gran medida el objetivo primordial de este trabajo, que es minimizar los costos asociados a la implementación de una red subterránea considerando la mejora sustancial de la confiabilidad del servicio.

Se debe enfatizar que el presente trabajo toma como restricciones, tanto a la caída de voltaje del alimentador secundario para delimitar el área de servicio de cada centro de transformación de MV/BV a una zona tal que garantice un nivel de voltaje adecuado al usuario final, así como al recorrido de las calles y vías públicas para determinar la trayectoria del alimentador primario, evitando de esta manera el paso por accidentes geográficos insalvables tales como quebradas o espacios restringidos, propiedades privadas, parques, centros educativos, entre otros.

El ejemplo descrito en esta publicación, como aplicación de la metodología de planificación propuesta, constituye el fundamento técnico de un proyecto de soterramiento eléctrico que abarca una gran superficie urbana de la ciudad de Ambato el cual actualmente está siendo implementado en el área de concesión de la Empresa Eléctrica Ambato RCN S.A., lo que permite evidenciar el carácter práctico y la adaptación a nuestra realidad de la propuesta metodológica aquí descrita.

La metodología de planificación propuesta puede ser ampliada para cubrir el enrutamiento de las redes secundarias,

para lo cual se puede utilizar como parámetros de entrada los resultados obtenidos en el módulo de ubicación óptima de centros de transformación y a partir de ellos generar los recorridos óptimos de los secundarios, siempre tomando como la más importante restricción a la regulación de voltaje, ya que este es uno de los aspectos que más incide en la calidad técnica de la prestación eléctrica.

Aun cuando este trabajo está enfocado en una planificación tipo *Greenfield Planning*, la cual es muy útil para el caso que contempla la migración de redes aéreas a subterráneas, los resultados entregados por el módulo de ubicación óptima de transformadores pueden servir como insumo para efectuar la planificación operacional de un determinado sector, sea que este se encuentre atendido actualmente por redes de tipo aéreo o subterráneo; puesto que, los parámetros obtenidos en este módulo generan una alternativa para la reubicación y reemplazo óptimos de los centros de transformación, convirtiéndose de esta manera en los datos de entrada de una propuesta dirigida a desarrollar una reconfiguración de las redes primarias del área de estudio.

VI. REFERENCIAS

[1] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.

[2] E. S. Thomas and B. Dorsett, *Underground Distribution System Design Guide*. Arlington, Virginia: Cooperative Research Network National Rural Electric Cooperative Association, 2008.

[3] H. L. Willis, *Power Distribution Planning Reference Book Second Edition, Revised and Expanded*, 2nd ed. New York, USA: Marcel Dekker, Inc, 2004.

[4] C. Solís Intriago, "Planificación de Redes Eléctricas de Distribución en Zonas Urbanas Consolidadas Considerando Criterios de Confiabilidad," Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.

[5] M. Gavrilas and O. Ivanov, "Distribution Systems Optimization with Computational Intelligence Algorithms," *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati - Romania*, vol. III, pp. 49-56, 2006.

[6] V. Dumbrava, P. Ulmeanu, P. Duquenne, C. Lazaroiu, and M. Scutariu, "Expansion Planning of Distribution Networks by Heuristic Algorithms," *Polytechnic University of Bucharest*, Jan-2010.

[7] D. Carrión, E. García, J. González, I. Idi, G. López, and R. Hincapié, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución," *Revista Técnica "energía"*, vol. 13, pp. 90-96, Jan-2017.

[8] M. García-Sanz and M. Otorongo, "Planificación y Diseño Automático Óptimo de Grandes Redes Eléctricas de Distribución," *Revista Técnica "energía"*, vol. 12, pp. 157-166, 2015.

[9] T. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.

[10] I. Castillo Toledo, "Coordinación de Estabilizadores en Redes de Potencia usando un Algoritmo Genético," *Instituto Tecnológico del Itzmo, México*, 1999. [Online]. Available: https://dricastillotoledo.itzmo.files.wordpress.com/2011/12/artic_algoritmos.do.

[11] L. Kaufman and P. Rousseeuw, *Finding Groups in Data. An Introduction to Cluster Analysis*, 1ra ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley I & Sons, Inc, 1990.

[12] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numer. Math.*, vol. 1, pp. 269-271, 1959.

[13] J. F. Villalpando and A. García Sandoval, *Matemáticas Discretas. Aplicaciones y Ejercicios*, 1st ed. México DF: Grupo Editorial Patria, 2014.

[14] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem.," *IEEE Trans Evol Comput*, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, 1997.

[15] A. Navarro, "Planificación de Redes de Distribución: Aproximación vía Clustering, Diagramas de Voronoi y Búsqueda Tabú," Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2007.

- [16] L. Fattouh, O. Karam, M. A. El Sharkawy, and W. Khaled, "Clustering for network planning.," *Wseas Trans. Comput.*, vol. 2, no. 1, pp. 197–202, 2003.
- [17] T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3ra ed. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2009.
- [18] C. Papadimitriou and K. Steiglitz, *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*, 2nd ed. Mineola, NY: Dover Publications Inc., 1992.
- [19] S. Ramírez Castaño, *Redes de Distribución de Energía*, 3rd ed. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

VII. BIOGRAFÍAS



Carlos Solís nació en Ambato, Ecuador, en 1972. Estudió en la Escuela Politécnica Nacional de Quito obteniendo los títulos de Ingeniero Eléctrico en 2000 y de Magister en Ingeniería Eléctrica en Distribución en 2018.

Su experiencia profesional se ha desarrollado en la Empresa Eléctrica Ambato RCN S.A., en la cual ha desempeñado varios cargos en áreas tales como: Diseño y Construcción de Redes Eléctricas de Distribución, Planificación, Operación y Mantenimiento de Redes Aéreas, entre otras. Actualmente se dedica a la Planificación, Diseño y Construcción de Redes Eléctricas de Distribución Subterráneas. Sus campos de interés son: planificación y confiabilidad de sistemas de distribución, optimización en los procesos de diseño y construcción de redes de distribución tanto aérea como subterránea, aplicación de herramientas de Inteligencia Artificial en sistemas eléctricos de distribución.



Hugo Arcos nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito en 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan - Argentina en 2005. Actualmente trabaja en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela

Politécnica Nacional de Quito como Profesor a Tiempo Completo. Sus áreas de especialización son: máquinas eléctricas, modelación de sistemas eléctricos, estudios de estabilidad de sistemas de potencia y confiabilidad de sistemas de distribución.