

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico.*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

**OPTIMIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE UN SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN RESIDENCIAL EN BAJO VOLTAJE, APLICANDO EL
MÉTODO GWO (*GREY WOLF OPTIMIZATION*)**

AUTORES:

PAUL SANTIAGO MERCHÁN GUARANGO

MILTON FERNANDO UGUÑA QUILLI

TUTOR:

ING. PABLO DANIEL ROBLES LOVATO, MSc.

CUENCA – ECUADOR

2019

CESIÓN DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Paul Santiago Merchán Guarango con documento de identificación N° 0105112841 y Milton Fernando Uguña Quilli con documento de identificación N° 0105056436, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RESIDENCIAL EN BAJO VOLTAJE, APLICANDO EL MÉTODO GWO (GREY WOLF OPTIMIZATION)”**, mismo que se ha 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 nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019.



.....
Paul Santiago Merchán Guarango.
C.I: 0105112841



.....
Milton Fernando Uguña Quilli.
C.I: 0105056436.

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RESIDENCIAL EN BAJO VOLTAJE, APLICANDO EL MÉTODO GWO (GREY WOLF OPTIMIZATION)”**, realizado por Paul Santiago Merchán Guarango y Milton Fernando Uguña Quilli, obteniendo el *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019.



.....
Ing. Pablo Daniel Robles Lovato MsC
C.I: 0101663342

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros Paul Santiago Merchán Guarango con documento de identificación N° 0105112841 y Milton Fernando Uguña Quilli con documento de identificación N° 0105056436, autores del trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RESIDENCIAL EN BAJO VOLTAJE, APLICANDO EL MÉTODO GWO (GREY WOLF OPTIMIZATION)”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre del 2019.



.....
Paul Santiago Merchán Guarango.
C.I: 0105112841



.....
Milton Fernando Uguña Quilli.
C.I: 0105056436.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por cuidar y proteger a mi familia y permitir que este sueño se haga realidad. A mi esposa Rebeca por su paciencia y confiar en mí, y mi querido hijo Mateo por su amor, cariño y alegría me motivo a seguir adelante. Gracias a mis padres Rigoberto y Celina por su apoyo incondicional brindado en cada decisión y proyecto. A mis hermanas Fabiola y Tania, y demás familiares por sus palabras de aliento y motivación.

Un agradecimiento especial al Ing. Pablo Robles, director de la carrera y docentes de la universidad por compartir sus conocimientos, quienes ha sido el pilar fundamental en mi formación profesional y el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, agradezco mis amigos y compañeros de carrera por los gratos momentos compartidos en clase.

Paul S. Merchán G.

Agradezco a Dios por haberme dado la vida, salud y fortaleza, lo que me ha permitido superar retos que se han presentado en el transcurso de mis estudios y así cumplir con esta meta.

A mis padres por su apoyo incondicional en todo momento de mi vida y sobre todo porque son un ejemplo a seguir, como también a mi hermano por brindarme su apoyo.

Al Ing. Pablo Robles director de este proyecto de titulación, que con su conocimiento me ha guiado de la mejor manera, a la Universidad Politécnica Salesiana por haberme dado una formación tanto personal como profesional.

Milton F. Uguña Q.

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico especialmente a Rebeca y Mateo quienes ha sido mi fuente de inspiración y motivación de superación. Mis padres por sus sacrificios y esfuerzos, y creer en mis capacidades. A mis hermanas Fabiola y Tania quienes ha sido mi ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

Paul S. Merchán G.

Dedicado a mis padres por brindarme su apoyo y consejos durante todo este proceso de vida universitaria. A mi hermano por su apoyo y estar al pendiente en todo momento.

Milton F. Uguña Q.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la optimización un Sistema de Distribución en Bajo Voltaje Residencial, el cual permitirá reducir las pérdidas técnicas que se dan en un sistema de distribución, como también pérdidas económicas hacia la empresa que distribuye energía eléctrica.

Un sistema de distribución tiene perdidas que se dan en el proceso del transporte de energía, estas pérdidas provocan una deficiencia en la calidad de servicio hacia los consumidores finales (usuarios). El nivel de voltaje fuera del rango establecido puede provocar daños a los aparatos que hacen uso de energía eléctrica.

Esto requiere la implementación de metodologías de optimización que permitan un diseño o reconfiguración de la topología existente de un sistema de distribución. Existen métodos que se basan en el comportamiento de la naturaleza o los animales, que se simula mediante un modelo matemático. Por lo tanto, estos métodos se aplican para resolver problemas ya sea a nivel de ingeniería u otros campos de la ciencia.

Entre las metodologías existentes se encuentra el método de optimización del lobo gris, que se basa en la supervivencia de los lobos en su hábitat. Este algoritmo implementado en un sistema puede encontrar una ruta adecuada para la reconfiguración de la topología.

Además de la aplicación del método se realizar el análisis de flujo de potencia, lo cual permite analizar por tramos caída de voltaje y pérdida de potencia. Por último, se realiza un análisis económico del sistema.

ABSTRACT

In the present work the optimization of a Residential in Low Voltage Distribution System is carried out, which will allow to reduce the technical losses that occur in a distribution system, as well as economic losses towards the company that distributes electricity.

A distribution system has losses that occur in the process of transporting energy, these losses cause a deficiency in the quality of service to end consumers (users). The voltage level outside the established range can cause damage to the devices that use electric power

This requires the implementation of optimization methodologies that allow a design or reconfiguration of the existing topology of a distribution system. There are methods that are based on the behavior of nature or animals, which is simulated by a mathematical model. Therefore, these methods are applied to solve problems either at the engineering level or other fields of science.

Among the existing methodologies is the Grey Wolf Optimization method, which is based on the survival of the wolves in their habitat. This algorithm implemented to a system, you can find a suitable path for reconfiguration of the topology.

In addition to the application of the method, the power flow analysis is carried out, which allows the analysis of voltage drop and power loss by sections. Finally, an economic analysis of the system is carried out.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.1. Problema de Estudio.	1
1.2. Justificación.	1
1.3. Grupo Objetivo.	1
1.4. Objetivos.	2
1.4.1. Objetivo General.	2
1.4.2. Objetivo Específico.....	2
CAPÍTULO 2 MARCO TEORICO REFERENCIAL.....	3
2.1. Método GWO (Grey Wolf Optimization).....	3
2.1.1. Metaheurística.....	3
2.1.2. Algoritmo de Optimización basado en inteligencia colectiva.	4
2.1.3. Lobos Grises.	5
2.1.4. Método GWO.....	6
2.1.5. Modelo Matemático.....	6
2.1.5.1. Rodear a la presa.	6
2.1.5.2. Caza de la presa.	7
2.1.5.3. Ataque a la presa.	9
2.1.5.4. Búsqueda de presas.	9
2.1.5.5. Modificaciones.....	10
2.1.5.6. Algoritmo y diagrama de flujo.....	10
2.1.6. Aplicaciones en la ingeniería.....	11
2.1.7. Optimización de un sistema de Distribución en BV.....	12
2.1.7.1. Implementación de la Metodología.	12
2.1.7.2. Implementación del Algoritmo en la red de distribución.	13
2.1.7.3. Criterios eléctricos usado en esta metodología.....	13
2.2. Sistema Eléctrico de Potencia.....	14

2.3.	Sistema de Red de Distribución.....	15
2.3.1.	Principales componentes de un sistema de distribución.....	15
2.3.2.	Sistema de distribución en Bajo Voltaje.....	15
2.3.3.	Tipos de Sistemas de Distribución.....	16
2.3.4.	Tipos de Redes de Distribución.....	18
2.3.4.1.	Red de distribución aérea.....	18
2.3.4.2.	Red de distribución Subterránea.....	19
2.3.5.	Clasificación de redes de distribución según su ubicación geográfica.....	19
2.3.6.	Estructuras de redes Aéreas en Bajo Voltaje.....	20
2.4.	Modelación de Sistema de Distribución.....	21
2.4.1.	Ecuaciones de Carson.....	21
2.4.2.	Modificación de Ecuación de Carson.....	22
2.4.3.	Matriz de Impedancia.....	23
2.5.	Flujo de Potencia o Carga, Caída de voltaje y Perdida de potencia.....	24
2.5.1.	Caída de Voltaje.....	25
2.5.2.	Pérdida de Potencia.....	25
2.6.	Método de Ardrinson.....	27
2.7.	Mejoras Técnicas en Red de Distribución.....	28
2.8.	Indicadores de Rentabilidad.....	29
2.8.1.	Valor Actual Neto (VAN).....	29
2.8.2.	Análisis Beneficio-Costo (RBC).....	29
CAPÍTULO 3 ELABORACIÓN DE GRAFO Y METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN.....		31
3.1.	Información de la Red de Distribución.....	31
3.2.	Elaboración de Grafo en el Sistema de Distribución (SD).....	31
3.3.	Función Objetivo.....	32
3.4.	Metodología para la Optimización.....	32
CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....		34
4.1.	Área Propuesta1 (AP1).....	34
4.1.1.	Red existente AP1.....	35

4.1.2. Flujo de Potencia de red existente.	36
4.1.3. Optimización de la red.	38
4.1.4. Análisis Económico.	44
4.2. Área Propuesta 2 (AP2).	46
4.2.3. Optimización de la red.	49
4.2.4. Análisis Económico.	55
4.3. Área Propuesta 3 (AP3).	56
4.2.3. Optimización de la red.	59
4.2.4. Análisis Económico.	66
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	68
5.1. Análisis AP1.	68
5.2. Análisis AP2.	69
5.3. Análisis AP3.	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	71
BIBLIOGRAFIA.	73
ANEXOS.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa conceptual de la clasificación de la Metaheurística	4
Figura 2. Jerarquía social de los lobos grises.....	5
Figura 3. Posiciones de los lobos alrededor de la presa.....	7
Figura 4. Movimiento de los agentes de búsqueda y actualización de la nueva posición.	9
Figura 5. Diagrama de flujo GWO	11
Figura 6. Red Eléctrica	12
Figura 7. Sistema Eléctrico de Potencia.	14
Figura 8. Topología anillo.....	16
Figura 9. Topología mallada.....	17
Figura 10. Topología radial.....	18
Figura 11. Estructuras aéreas en Bajo Voltaje.....	21
Figura 12. Conductores e imágenes en la tierra, fórmula Carson.	22
Figura 13. Elaboración de grafo.....	31
Figura 14. Área Propuesta 1.....	34
Figura 15. Sistema radial AP1.	36
Figura 16. Despliegue de red en AP1.	38
Figura 17. Proceso de búsqueda AP1.	40
Figura 18. Red Optimizada AP1.....	41
Figura 19. Asignación numérica a los nodos de la red optimizada AP1.	42
Figura 20. Análisis de corrientes en ramales.	43
Figura 21. Área Propuesta 2.....	46
Figura 22. Despliegue de red en AP2.	47
Figura 23. Red Optimizada AP2.....	51
Figura 24. Asignación numérica a los nodos de la red optimizada AP2.	52
Figura 25. Área Propuesta 3.....	56
Figura 26. Despliegue de red en AP3.	57
Figura 27. Red Optimizada AP3.....	61
Figura 28. Asignación numérica a los nodos de la red optimizada AP3.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Expresiones para calcular las caídas de voltaje.	25
Tabla 2. Expresiones para calcular pérdidas de potencia activa.	26
Tabla 3. Expresiones para calcular el parámetro M.	26
Tabla 4. Datos de la red existente.	35
Tabla 5. Flujo de potencia de red existente.	37
Tabla 6. Flujo de potencia total de red existente AP1.	37
Tabla 7. Resultados de la optimización AP1.	39
Tabla 8. Resultados de corrientes en ramales.	43
Tabla 9. Flujo de potencia de red Optimizada AP1.	44
Tabla 10. Flujo de potencia total de red optimizada.	44
Tabla 11. Análisis RBC para AP1.	45
Tabla 12. Datos de red y sus posibles caminos para AP2.	48
Tabla 13. Resultado de la optimización AP2.	49
Tabla 14. Resultado de corrientes en ramales.	52
Tabla 15. Flujo de potencia de red Optimizada AP2.	54
Tabla 16. Flujo de potencia total de red optimizada AP2.	55
Tabla 17. Análisis RBC para AP2.	55
Tabla 18. Datos de red y sus posibles caminos AP3.	57
Tabla 19. Resultado de la optimización de la red AP3.	59
Tabla 20. Resultado de corrientes en ramales.	63
Tabla 21. Flujo de potencia de red Optimizada AP3.	64
Tabla 22. Flujo de potencia total de red optimizada.	66
Tabla 23. Análisis RBC para AP3.	66
Tabla 24. Comparación de resultados AP1.	68
Tabla 25. Comparación de resultados AP2.	69
Tabla 26. Comparación de resultados AP3.	70

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

SEP: *Sistema Eléctrico de Potencia.*

SD: *Sistema de Distribución.*

GA: *Algoritmo Genético.*

GWO: *Grey Wolf Optimization.*

ΔP : *Pérdida de Potencia se expresa en porcentaje.*

ΔV : *Pérdida de Voltaje se expresa en porcentaje.*

LCK: *Ley de Corrientes de Kirchhoff.*

ni: *nodo de envío.*

nj: *nodo de recibo.*

Lni: *Longitud acumulada.*

Lnij: *Longitud por tramo.*

VAN: *Valor Actual Neto.*

RBC: *Razón Beneficio Costo.*

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. Problema de Estudio.

Las redes eléctricas que suministran energía deben proveer de un servicio de calidad a los usuarios según los reglamentos establecidos por los entes reguladores. El análisis inadecuado de la red puede llevar al sobredimensionamiento del sistema trayendo consigo pérdidas económicas por el uso excesivo de recursos, de igual manera una red deficiente puede generar grandes caídas de voltaje y pérdidas técnicas por transporte de energía ocasionando molestias a los clientes. Todos estos problemas generan pérdidas económicas tanto al usuario como a la empresa distribuidora.

1.2. Justificación.

La optimización del sistema de distribución de Bajo Voltaje permite dar un servicio eficiente del suministro de energía eléctrica por parte de la empresa distribuidora, así se puede garantizar que los niveles de voltaje en zonas urbanas o rurales estén dentro de los límites establecidos, permitiendo obtener una topología (*camino*) de red adecuada para la distribución de energía eléctrica hacia los usuarios.

Mediante este estudio se puede hacer eficiente los puntos de entrega por parte de la empresa distribuidora de energía eléctrica, cumpliendo con los valores establecidos de niveles de voltaje hacia los usuarios finales.

1.3. Grupo Objetivo.

- Profesionales calificados en libre ejercicio.
- Empresas Distribuidoras.
- Usuarios finales.

1.4.Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

Desarrollar la aplicabilidad del modelo matemático que permita determinar la topología adecuada de una red en bajo voltaje, mediante la optimización por parámetros de flujo de potencia, aplicando la metodología GWO.

1.4.2. Objetivo Específico.

- Estudiar el procedimiento e implementación del método de Optimización GWO.
- Estudiar las redes de distribución residencial en bajo voltaje.
- Aplicar el modelo que permita optimizar la topología del sistema de distribución en bajo voltaje, mediante el método GWO.
- Ejecutar y analizar los resultados con datos de un sistema de distribución residencial de bajo voltaje.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO REFERENCIAL.

2.1. Método GWO (Grey Wolf Optimization).

2.1.1. Metaheurística.

Es un método de optimización, cuyos algoritmos están basados en el comportamiento de la naturaleza como fenómenos físicos, comportamiento de animales o conceptos evolutivos. [1] El objetivo de este método es de mejorar los procedimientos de optimización con la finalidad de lograr una mayor efectividad en la solución de problemas. [2] Esta metodología se encuentra ampliamente utilizado en los diferentes campos de estudio debido a su flexibilidad y simplicidad en comparación con los métodos de optimización tradicionales. [1][3]

Los algoritmos metaheurísticos se clasifican en tres clases principales:

- Los algoritmos evolutivos que se basan en la evolución de la naturaleza, a partir de este concepto se origina el método GA (algoritmos genéticos) el cual simula la teoría de la evolución de Darwin. [4][5]
- Técnicas basadas en la física que se fundamentan en las leyes de la física como por ejemplo GSA (algoritmo de búsqueda gravitacional), este algoritmo simula la Ley de Newton de atracción gravitacional. [4][5]
- La inteligencia colectiva este algoritmo simula el comportamiento social de manadas, enjambres, rebaños en la naturaleza. Siendo popular el ACO (algoritmo de colonia de hormigas). [4][5]

Los tipos de algoritmos de la metaheurística y sus ejemplos se muestra en el mapa conceptual de la *figura 1*.



Figura 1. Mapa conceptual de la clasificación de la Metaheurística

Fuente: [Autores].

Debido a una amplia variedad de las técnicas metaheurísticas, es importante recalcar que no toda técnica es aplicable para una solución en general. Para la elección de la técnica adecuada de optimización es importante tomar en cuenta: [1][6]

- La eficiencia del algoritmo.
- Identificar el algoritmo adecuado para el problema.
- La efectividad numérica.

2.1.2. Algoritmo de Optimización basado en inteligencia colectiva.

Los algoritmos basados en la inteligencia colectiva se derivan del comportamiento colectivo de las distintas especies en la naturaleza. [9] Los métodos más comunes son:

- Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO). Se basa en la inteligencia social de las hormigas al momento de la búsqueda de alimentos, para encontrar un camino corto.[4][7]
- Optimización de Partícula de Enjambres (PSO). Inspirado en el comportamiento social de las parvadas de aves o banco de peces, estos se mueven de acuerdo a la posición de la mejor partícula. [4][7]
- Colonia de Abejas Artificiales (ABC). Se basa en el método de recolección de alimentos de una colonia de abejas. [4][7]

2.1.3. Lobos Grises.

El lobo gris (*Canis Lupus*) es un mamífero depredador que se alimenta de carne, donde cada manada está compuesta en promedio de 5 a 12 lobos. Estos lobos habitan en Norteamérica en las fronteras de Estados Unidos y Canadá, de la cual su aspecto es variado en el que podemos encontrar 10 subespecies diferentes que se derivan de este. [4]

La división jerárquica social de la manada *figura 2*, hace que el proceso de caza sea una de las más eficientes. La manada está compuesta por los lobos alfa (α), beta (β), delta (δ) y los lobos omegas (ω). [8],[9]

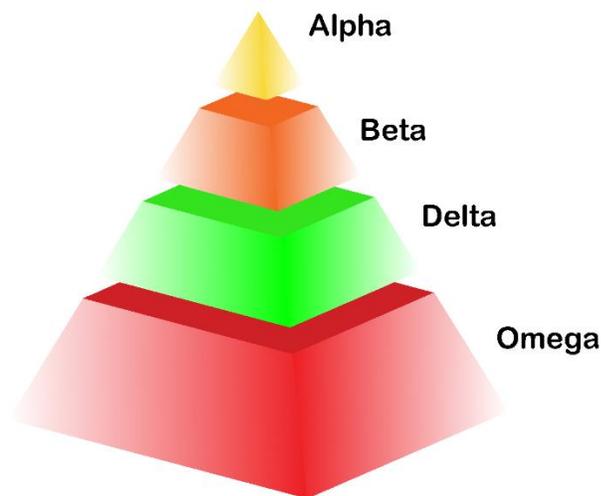


Figura 2. Jerarquía social de los lobos grises
Fuente: [10].

Los lobos alfa (α) se encuentran en el primer nivel de la pirámide social, estos son los líderes de la manada, está compuesto por un macho y una hembra. El macho es el encargado de la toma de decisiones sobre la caza, descanso, etc., estas órdenes son dictadas al resto de la manada. El líder no necesariamente el más fuerte de la manada, sino que se le asigna por su capacidad de liderazgo dentro del mismo. [4],[3]

Los lobos beta (β) del segundo nivel de la pirámide social son los llamados subordinados, se consideran los asistentes de los lobos alfa. Estos lobos ayudan en la toma de decisiones a los lobos alfa. [4],[7]

Los lobos delta (δ) se encuentran en el tercer nivel de la pirámide social, este nivel está formado por los lobos exploradores y centinelas. Los exploradores son los encargados de vigilar los límites del territorio y de advertir ante un peligro. Los lobos centinela protegen y garantizan la seguridad de la manada.[4],[8]

Los lobos omegas (ω) se encuentran en el último nivel de la pirámide social, estos deben someterse a las órdenes de los lobos superiores.[4],[8]

2.1.4. Método GWO.

Es un método de optimización metaheurística que fue desarrollado por el australiano Seyedali Mirjalili en el año 2014, el cual simula el proceso de caza de los lobos grises: rodear, cazar y atacar. De acuerdo con la jerarquía social se tomará como la mejor solución al lobo alfa y las segundas mejores soluciones al lobo beta y delta.[4],[8]

2.1.5. Modelo Matemático.

2.1.5.1. Rodear a la presa.

La caza comienza con su localización, una vez localizada la rodean a su presa. Los lobos alfa, beta y delta guían la caza, mientras que los omegas ayudan a rodear para encontrar una mejor solución.[3] Este acorralamiento se modela matemáticamente:

$$D = |C * X_p(t) - X(t)| \quad (2.1)$$

$$X(t + 1) = X_p(t) - A * D \quad (2.2)$$

Donde:

t es la iteración actual.

A y D son vectores de coeficientes.

X_p es el vector de la posición de la presa.

X es la posición de un lobo gris.

$$C = 2r_2 \quad (2.3)$$

$$A = 2a * r_1 - a \quad (2.4)$$

r_1 y r_2 son valores aleatorios en un rango de [0,1].

a es un vector que disminuye linealmente de 2 a 0.

$$a = 2 - t \frac{2}{\# Total iter.} \quad (2.5)$$

Los valores aleatorios de r_1 y r_2 hacen que varíe los vectores A y C en cada iteración, el cual permite que los lobos puedan alcanzar cualquier posición alrededor de la presa como se muestra en la *figura 3*.

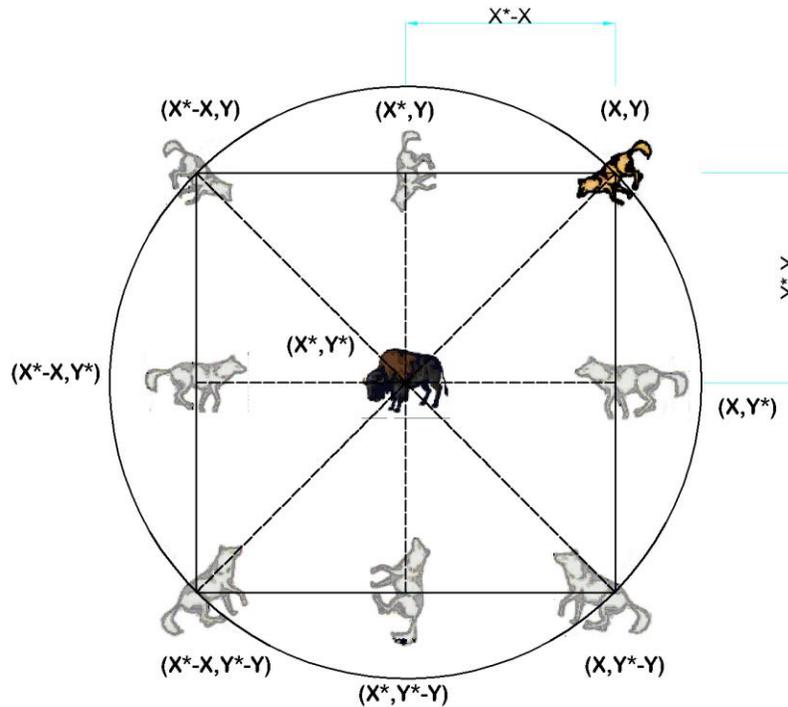


Figura 3. Posiciones de los lobos alrededor de la presa.
Fuente: [4]

2.1.5.2. Caza de la presa.

Este proceso es guiado por el lobo alfa en el que también participan los lobos beta y delta, en el que inicialmente no se sabe la posición óptima de la presa.[3] El modelado matemático de este comportamiento inicia suponiendo que el alfa, beta y delta tiene un mejor conocimiento sobre la ubicación de la presa, en donde el lobo alfa es la mejor solución. Una vez conocida la ubicación de las tres mejores soluciones se obliga al resto de la manada a actualizar la posición con respecto a estos. Matemáticamente se puede representar de la siguiente manera: [4],[7]

$$D_\alpha = | C_1 * X_\alpha - X | \quad (2.6)$$

$$D_{\beta} = |C_2 * X_{\beta} - X| \quad (2.7)$$

$$D_{\delta} = |C_3 * X_{\delta} - X| \quad (2.8)$$

Donde:

D_{α} , D_{β} y D_{δ} son las distancias de los lobos.

C_1 , C_2 , C_3 son vectores que varían de acuerdo al valor randómico r .

X_{α} , X_{β} , X_{δ} son las posiciones de los tres mejores agentes de búsqueda.

X es el parámetro de actualización en cada iteración para las siguientes búsquedas.

$$X_1 = |X_{\alpha} - A_1 D_{\alpha}| \quad (2.9)$$

$$X_2 = |X_{\beta} - A_2 D_{\beta}| \quad (2.10)$$

$$X_3 = |X_{\delta} - A_3 D_{\delta}| \quad (2.11)$$

X_1 , X_2 y X_3 son ecuaciones permiten calcular las posiciones de los tres mejores lobos.

A_1 , A_2 , A_3 son vectores que varían de acuerdo al número de iteraciones.

La estimación de la posición de la presa se determina a través de la posición de los tres mejores agentes como se muestra en la *figura 4* y se interpreta en la siguiente ecuación:

$$x_{(t+1)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (2.12)$$

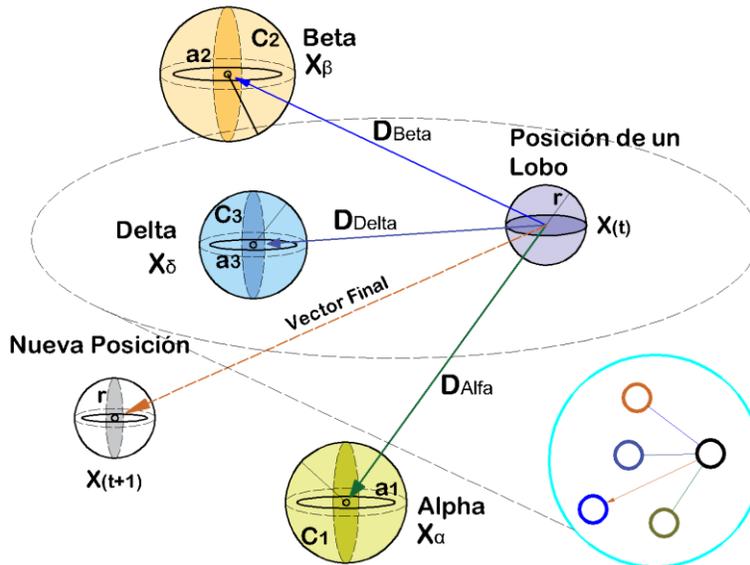


Figura 4. Movimiento de los agentes de búsqueda y actualización de la nueva posición.
Fuente: [7].

2.1.5.3. Ataque a la presa.

Una vez que se concluya los pasos anteriores los lobos terminan por atacar a la presa cuando este deje de moverse. Para simular este proceso recordamos que A está en función de a , el valor de a decrece de 2 a 0 conforme pasan las iteraciones. Entonces el valor de A estará en un rango $[-2a, 2a]$, en el transcurso de las iteraciones el valor disminuye de $|2a|$ hasta llegar a cero. El modelado matemático de este proceso esta descrito por $|A| < 1$ el cual indica que la manada deberá atacar a la presa. [4],[7]

2.1.5.4. Búsqueda de presas.

En la búsqueda de la presa los lobos grises se separan los unos de los otros, estos a su vez se mueven en referencia de acuerdo con la posición de los lobos alfa, beta y delta. El modelado matemático esta descrito por la ecuación $|A| > 1$, el cual obliga a los lobos apartarse y buscar a una nueva presa. Otro factor que puede afectar en la caza es el valor de C que es considerado como obstáculos existentes en la naturaleza que impide acercarse a la presa. Tomando en cuenta que el valor de C es un valor aleatorio y no disminuya a cero, es útil ya que evita estancamientos durante las iteraciones, esto facilita la exploración de los lobos. [4]

2.1.5.5. Modificaciones.

Con la finalidad de obtener un mejor equilibrio en la exploración y explotación, de acuerdo con las investigaciones realizadas, este equilibrio se lograría al actualizar de manera dinámica los parámetros y las diferentes estrategias para actualizar a los agentes de búsqueda. Con la modificación del factor a , esta vez este factor disminuye su valor de manera exponencial como se muestra en la ecuación (2.13) y ya no de manera lineal. [10]

$$a = 2 * \left(1 - \frac{Iter^2}{MaxIter^2}\right) \quad (2.13)$$

Otras investigaciones demostraron que se puede modificar la ecuación de cálculo de a , utilizando el criterio de no linealidad como se muestra en la ecuación (14). Donde μ es el índice de modulación no lineal que está en el intervalo de (0, 3), estas variaciones han mostrado mejores resultados en la exploración y explotación. [10]

$$a = \left(1 - \frac{Iter}{Max_Iter}\right) * \left(1 - \mu \frac{Iter}{MaxIter}\right)^{-1} \quad (2.14)$$

2.1.5.6. Algoritmo y diagrama de flujo.

Una de las formas más óptimas de búsqueda y caza de una presa, es la que emplean los lobos grises. Su comportamiento social ha permitido que la caza de una presa sea una de las más exitosas de la naturaleza.

El diagrama de flujo del algoritmo GWO.

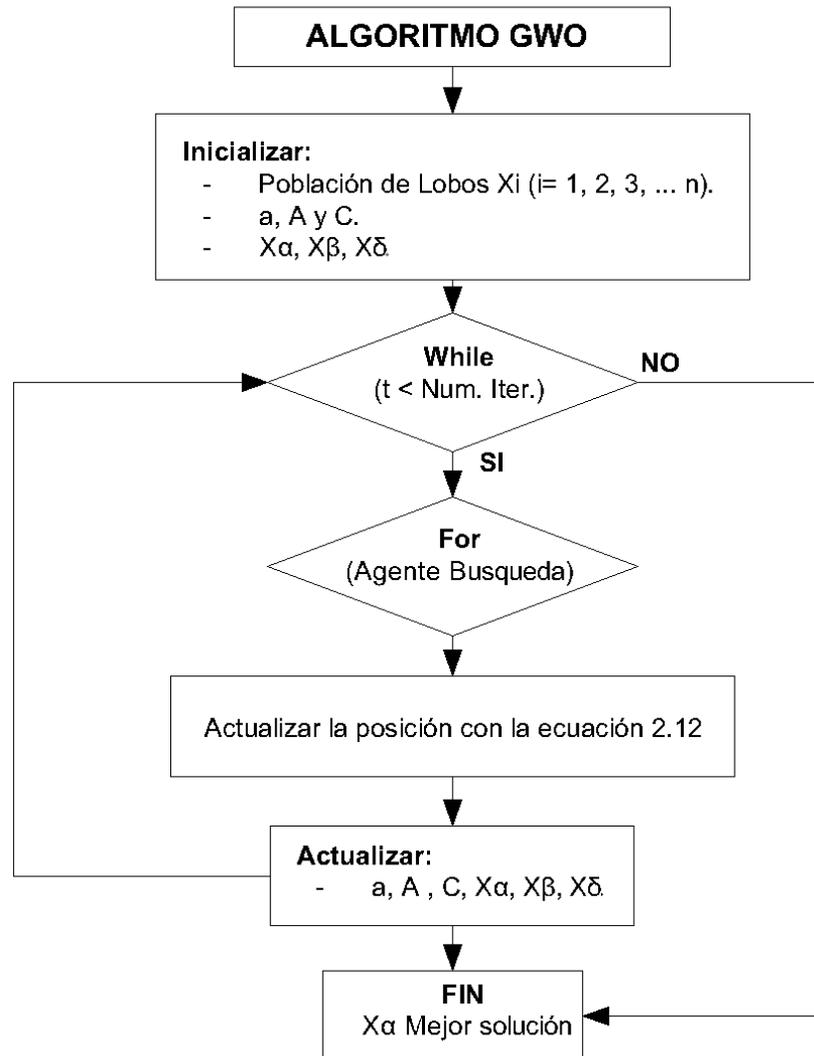


Figura 5. Diagrama de flujo GWO
Fuente: [Autores].

2.1.6. Aplicaciones en la ingeniería.

El algoritmo ha sido implementado en varias ramas de la ciencia debido a su alta efectividad en los resultados de la optimización. Este algoritmo es empleado para la resolución de múltiples problemas, como son de optimización global, en ingeniería eléctrica y electrónica, problemas de distribución de energía, ingeniería de control, robótica, planificación de rutas, entre otros. [10],[11] La optimización dentro de la ingeniería ha resultado crucial para el desarrollo de la humanidad:

- “Diseño de una viga soldada.
- Diseño de recipientes de presión.
- Diseño de buffer óptico.
- Flujo de Potencia Optimo.
- Controlador PID.
- Despacho económico de un sistema de energía”.[11]

2.1.7. Optimización de un sistema de Distribución en BV.

Una red eléctrica adecuada debe tener una menor cantidad de pérdidas de potencia y bajas caídas de voltaje en sus extremos. Esos factores garantizan el correcto funcionamiento del sistema y a su vez generan menores pérdidas económicas para la empresa distribuidora. Bajo los criterios de la metodología se provee diseñar un sistema que cumpla estas restricciones exigidas por los entes reguladores.

2.1.7.1. Implementación de la Metodología.

La aplicación del método en el diseño de la red de distribución, consta en dividirla por etapas con el fin de ordenar los nodos (i, j) siendo $i < j$, la misma que se usará en lo posterior. Para cada nodo se crea una población de lobos, se calcula las aptitudes y se selecciona a los tres mejores. Los tres mejores servirán como referencia para llegar a los siguientes nodos en la siguiente etapa. Este procedimiento se utilizará hasta llegar a la última etapa, de esta manera se generará una red radial conforme se realicen los cálculos en cada etapa. El camino generado aplicando dicha metodología puede estar basado en una de las dos restricciones eléctricas ya sea las pérdidas de potencia o las caídas de voltaje.

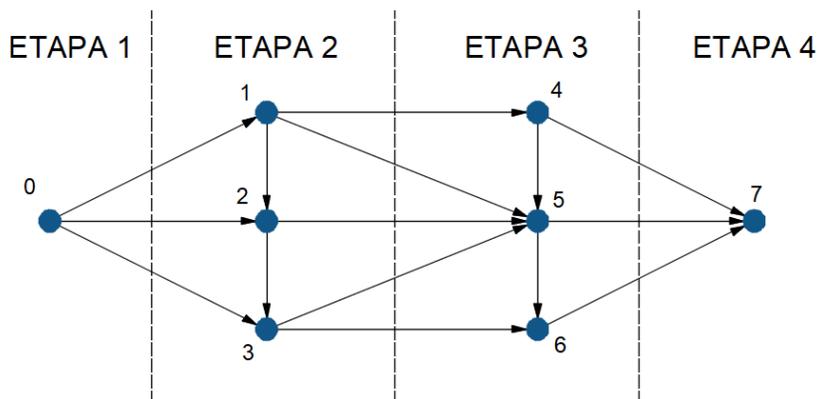


Figura 6. Red Eléctrica
Fuente: [Autores].

2.1.7.2.Implementación del Algoritmo en la red de distribución.

1. Crear la población de los lobos de acuerdo con la cantidad de trayectorias que llegan al nodo.
2. La población puede ser $X_i(i = 1, 2, 3, \dots n)$
3. Establecer las posiciones de los nodos (x, y)
4. Introducir el número de iteraciones ($Iter \leq 60$)
5. Inicializar los parámetros a, A, C .
6. Cálculo de aptitudes de cada uno de los lobos y seleccionamos a las tres mejores soluciones. El cálculo de $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ (distancia a la posición del nodo) se basa en la ecuación de la función objetivo que se desea optimizar.
7. Se inicia el bucle *While*

While ($t < iter$)

for (actualizar las aptitudes de cada uno de los lobos)

8. Actualizar la posición de cada uno al valor calculado mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación (2.6), (2.7), (2.8)

Ecuación (2.9), (2.10), (2.11)

End_for

9. Se actualiza los parámetros a, A, C .
10. Cálculo de aptitudes de cada uno de los lobos, es decir las distancias de cada uno de los lobos.
11. Seleccionamos las aptitudes de los tres mejores agentes $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$, estos serán los caminos en el que la función objetivo tenga un menor valor.
 $t = t + 1$
End_while
12. Seleccionamos la distancia menor, como el camino óptimo para llegar a la posición del nodo (X_α).

2.1.7.3.Criterios eléctricos usado en esta metodología.

Al diseñar una red de distribución se toma en consideración restricciones según sea el caso de estudio como: pérdidas de potencia (ΔP), caídas de voltaje (ΔV). La metodología de

optimización busca obtener una red de distribución eléctrica en el cual se genere menor valor de ΔP y ΔV .

De acuerdo con la topología de la red de distribución de bajo voltaje, existen diferentes fórmulas propuestas para el cálculo de las pérdidas de potencia y las caídas de voltaje.

Luego de realizar la optimización de la red en base a la menor distancia entre los nodos para etapas, mediante flujos de potencia se calcularán los valores de ΔP y ΔV del sistema.

2.2. Sistema Eléctrico de Potencia.

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está formado por etapas, los cuales permiten cumplir con una función específica que es de abastecer de energía eléctrica a los usuarios, donde se debe cumplir con características como: calidad, seguridad y confiabilidad.[12]

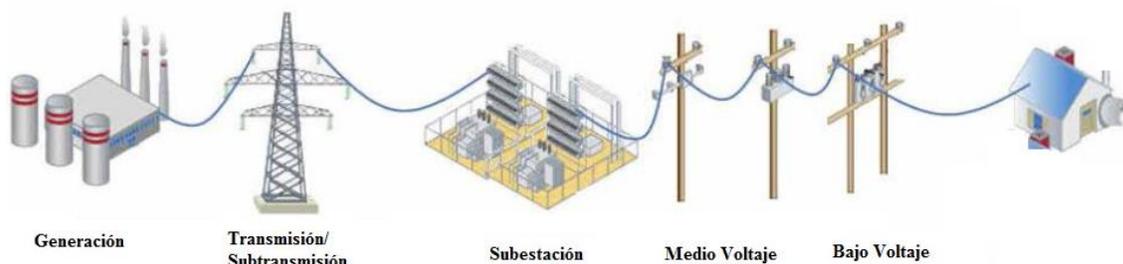


Figura 7. Sistema Eléctrico de Potencia.

Fuente: [13].

Las etapas que tiene un sistema eléctrico de potencia son las siguientes:

- ✓ *Generación*: En esta parte están las plantas generadoras.
- ✓ *Transmisión*: Son redes que transportan energía desde la etapa de generación.
- ✓ *Distribución*: Es la etapa que recibe energía de la etapa de transmisión para distribuir energía hacia los distintos usuarios.

Dentro de cada etapa hay procesos de transformaciones que se realiza para el transporte de la energía eléctrica.

2.3. Sistema de Red de Distribución.

El sistema de distribución está conectado a un sistema de transmisión/subtransmisión, mediante una subestación de distribución se reduce el nivel de voltaje para su transporte (*alimentador primario*) hacia los transformadores de distribución, en donde se reduce el voltaje a los niveles establecidos para el consumo, finalmente es transportada a través de redes de bajo voltaje y acometidas hacia el usuario final. Siendo una de las etapas complejas debido a la gran cantidad de información que esta maneja. [12],[13],[14]

La red de bajo voltaje es una etapa que tiene una inversión del 2/3 del total de inversión de un SEP, por lo que es de gran importancia realizar un estudio integro de: planeamiento, diseño y construcción. De esta manera el sistema puede ser modificado en un futuro sin cambios significativos en su topología existente, con el fin de asegurar un servicio adecuado y continuo para las futuras cargas. [12],[14]

2.3.1. Principales componentes de un sistema de distribución.

El sistema de distribución esta compuesto por:

- *Alimentadores primarios de distribución:* Es el que lleva la energía eléctrica desde la subestación hacia los transformadores de distribución.
- *Transformadores de distribución:* Es el encargado de reducir el nivel de voltaje primario para que el usuario puede hacer uso de la energía eléctrica.
- *Alimentadores secundarios:* Son los encargados de transportar energía eléctrica del transformador de distribución hasta la acometida de usuario.
- *Acometidas:* Permiten la conexión de distribuidora con instalaciones del usuario.
- *Medición:* Es un contador que permite determinar el consumo del usuario.

2.3.2. Sistema de distribución en Bajo Voltaje.

El sistema entrega energía eléctrica a partir del lado secundario de transformador de distribución (*bajo voltaje*) mediante la red de bajo voltaje y la acometida hacia los usuarios ya sea de forma aérea o subterránea, donde hasta la actualidad el sistema aéreo es el más utilizado. Las redes de baja tensión normalmente son radiales del tipo monofásico y trifásico.[15],[13]

El suministro de energía en bajo voltaje es entregado a clientes: residenciales, comerciales, alumbrado público y los niveles de voltaje típicos son: 220/127, 240/120 V. El rango a ser considerado para bajo voltaje es menor a 600V hasta la actualidad.

2.3.3. Tipos de Sistemas de Distribución.

El sistema de distribución puede ser tipo anillo, mallado, radial.

- **Sistema Anillo.**

Es una topología que garantiza una continuidad de servicio de energía al usuario, ya que la red parte desde una fuente de alimentación hacia las cargas y retorna hacia el punto inicial. [13] Haciendo que el sistema tenga un alto grado de confiabilidad, pero esto implica un costo en su planeamiento.

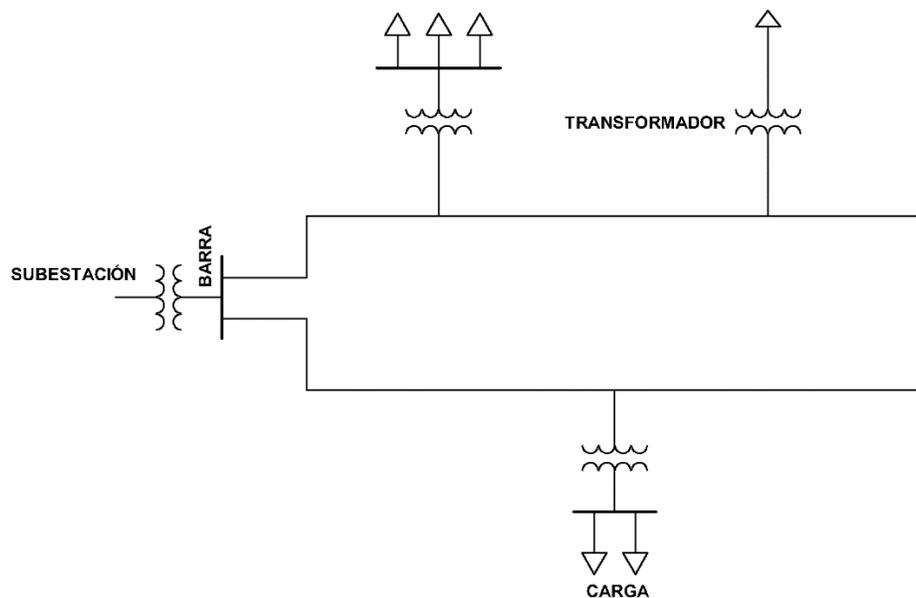


Figura 8. Topología anillo.
Fuente: [Autores].

- **Sistema Mallado.**

El sistema mallado este compuesto por distintas fuentes que permiten alimentar cargas que requieran una continuidad y estabilidad de servicio eléctrico, siendo una de las topologías más costosas.[13]

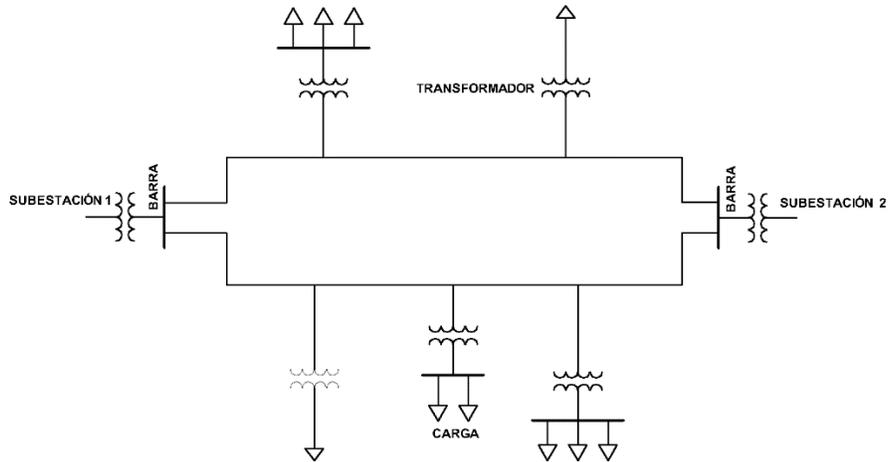


Figura 9. Topología mallada
Fuente: [Autores].

- **Sistema Radial.**

Es uno de los sistemas que comúnmente existen ya que su construcción es desde la fuente de alimentación hacia la carga sin retorno, por lo que resulta menos costosa. Así mismo esta topología trae desventajas como: confiabilidad baja del servicio en caso de averías y mantenimientos, limita la ampliación del suministro.[13]

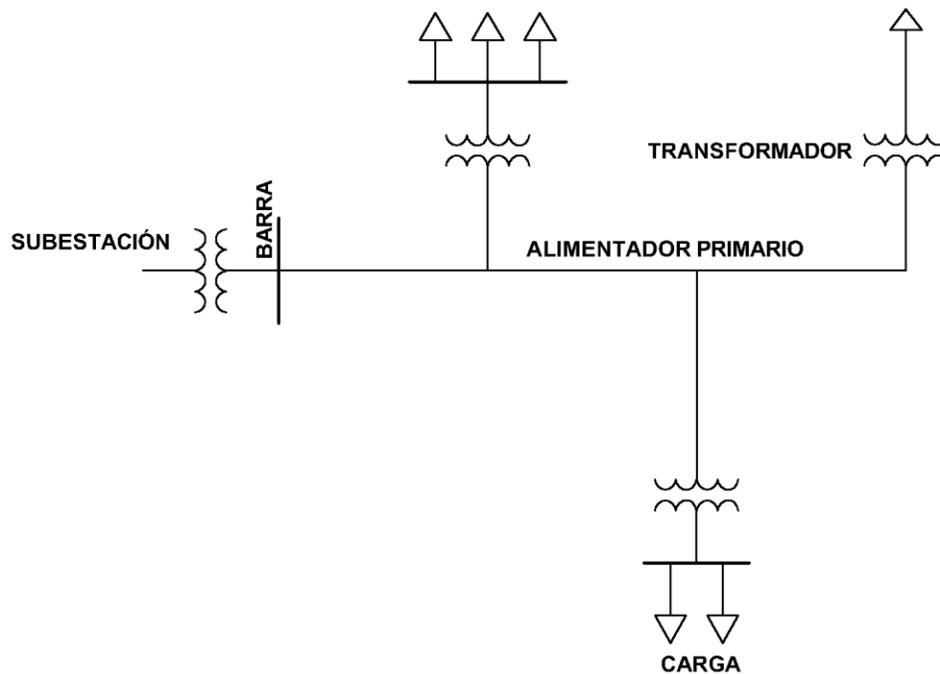


Figura 10. Topología radial
Fuente: [Autores].

2.3.4. Tipos de Redes de Distribución.

Las redes de distribución se clasifican según su construcción en: aéreo y subterráneo. La construcción depende de la zona bajo análisis (urbano- rural) y de las normativas que tenga cada ciudad o país (planificación urbana).

2.3.4.1.Red de distribución aérea.

Una red aérea normalmente se encuentra en zonas urbanas y rurales, siendo la más usadas hasta la actualidad. Está compuesto principalmente: poste, conductor, rack de varias vías, aisladores, equipo de seccionamiento, transformador y protecciones.

Las mismas que tienen ventajas al estar construidas en el aire:

- Costos bajos.
- Facilidad de mantenimiento.
- Rápida localización de fallas.
- Rápida ejecución en su construcción.[13]

2.3.4.2.Red de distribución Subterránea.

Una red subterránea se encuentra en zonas urbanas y urbanizaciones, siendo una instalación que se ha vendido implementando en los últimos tiempos por las empresas eléctricas distribuidoras. Este compuesto por: Ductos, cables, cámaras, empalmes, uniones y terminales.

Sus ventajas al estar construidas bajo tierra:

- Mayor confiabilidad del sistema.
- Evitan el robo de energía eléctrica.
- Mejora la estética del lugar de la instalación. [13]

2.3.5. Clasificación de redes de distribución según su ubicación geográfica.

La red de distribución según su ubicación geográfica puede ser: urbano, rural, suburbano, turística.

- **Red de distribución Urbano:** las empresas distribuidoras planifican de acuerdo a características que estas zonas tienen:
 - ✓ Cargas concentradas y de distintas necesidades: monofásicas, trifásicas.
 - ✓ Uso de postes y pozos para red subterráneas.
 - ✓ Redes eléctricas deben ser diseñadas según los demás servicios básicos que tenga la zona.
 - ✓ Conductor: aluminio y cobre.
 - ✓ Generalmente uso de transformadores trifásicos.
 - ✓ Distancia entre conductores y estructuras son menores.[12]
- **Red de distribución Rural:** En un área rural la red presenta mejores ventajas en caso de expansión o ubicación. No generan una rentabilidad económica alta como en las zonas urbanas ya que el consumo es menor.[12]

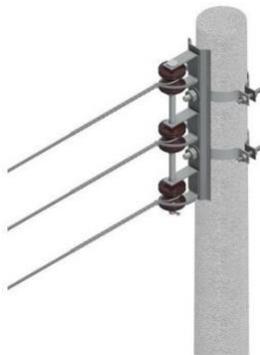
Se detallan algunas características:

- ✓ Generalmente cargas monofásicas.
- ✓ Usuarios se encuentran dispersos.

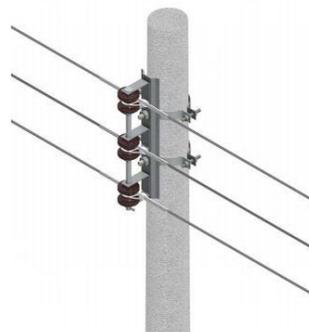
- ✓ Dificultades de acceso a las zonas.
 - ✓ En zonas accesibles se usa poste de hormigón y en los inaccesibles postes de madera o fibra de vidrio.
 - ✓ Transformadores monofásicos.
 - ✓ Conductor de aluminio ACSR.[12]
- **Red de distribución Suburbano:** Posee una gran cantidad de usuarios, pero con un consumo bajo.
 - **Red de distribución Turístico:** Esta caracterizado por tener cargas temporales, debido a épocas de vacaciones, además la construcción de redes es subterránea por estética del lugar.[12]

2.3.6. Estructuras de redes Aéreas en Bajo Voltaje.

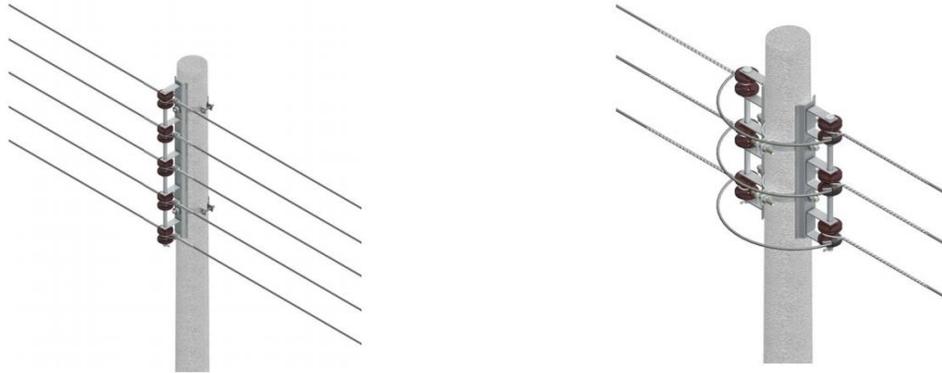
Las redes en bajo voltaje tienen algunas topologías, las cuales has sido comúnmente usadas de acuerdo a su ubicación geográfica como también a las cargas que esta tenga que abastecer.



a). Estructura de 3 vías vertical retención



b). Estructura de 3 vías vertical pasante angular.



c). Estructura de 5 vías vertical pasante angular. d). Estructura de 3 vías vertical doble retención.

Figura 11. Estructuras aéreas en Bajo Voltaje.

Fuente: [16].

2.4. Modelación de Sistema de Distribución.

2.4.1. Ecuaciones de Carson.

Dentro de un sistema de distribución es de gran importancia realizar un análisis exhaustivo en la modelación de las redes, para la cual se realiza mediante la matriz de secuencia que por medio de impedancias de secuencia se puede modelar líneas de distribución ya sean estas aéreas o subterráneas. [15],[17]

Para el cálculo de las impedancias de líneas se realizan mediante las ecuaciones de Carson, ya que permiten determinar componentes de secuencia positiva, negativa y cero. [18]

Las ecuaciones de Carson originales son:

$$Z_{ii} = R_i + 4\omega P_{ii}G + j \left[X_i + 2\omega G \ln \frac{S_{ii}}{RMG_i} + 4\omega Q_{ii}G \right] \Omega/milla \quad (2.15)$$

$$Z_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j \left[2\omega G \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4\omega Q_{ij}G \right] \Omega/milla \quad (2.16)$$

Donde:

Z_{ii} = Impedancia propia del conductor con retorno de tierra.

Z_{ij} = Impedancia mutua entre los conductores i y j .

R_i = Resistencia del conductor (Ω/km).

f = Frecuencia del sistema (Hz).

$\omega = 2\pi f$; Frecuencia angular (rad/sg).

$G = 0,1609347 * 10^{-3}$ (Ω/km)

RMG_i = Radio medio geometrico del conductor i (m).

D_{ij} = Distancia entre el conductor i y j (m).

S_{ii} = Distancia del conductor i a su imagen (m).

S_{ij} = Distancia del conductor i a la imagen del conductor j (m).

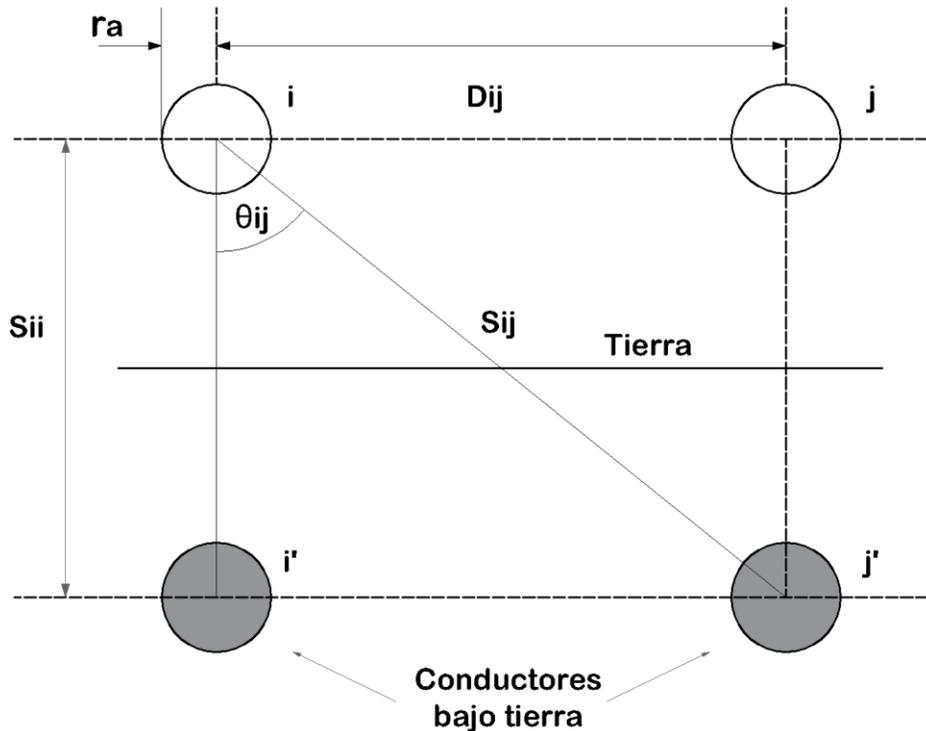


Figura 12. Conductores e imágenes en la tierra, fórmula Carson.

Fuente: [17].

2.4.2. Modificación de Ecuación de Carson.

La modificación de las ecuaciones se obtiene mediante la aproximación de términos: P_{ij} y Q_{ij} . [18] Considerando una frecuencia del sistema de 60 Hertz y una resistividad de terreno de $100 \Omega \cdot m$, se obtiene lo siguiente:

$$Z_{ii} = R_i + 0,09530 + j0,12134 \left[\ln \frac{1}{RMG_i} + 7,93402 \right] \frac{\Omega}{milla} \quad (2.17)$$

$$Z_{ij} = 0,09530 + j0,12134 \left[\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right] \frac{\Omega}{milla} \quad (2.18)$$

2.4.3. Matriz de Impedancia.

La obtención de las impedancias de secuencias se realiza mediante las ecuaciones de Carson y reducción de Kron.[19] Se presenta los voltajes de fase línea a tierra y voltajes de secuencia línea-tierra: [18]

$$\begin{bmatrix} VL_{a-g} \\ VL_{b-g} \\ VL_{c-g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} VL_{G0} \\ VL_{G1} \\ VL_{G2} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

Reduciendo la *ecuación 2.19*, se obtiene lo siguiente:

$$[VL_{abc-g}] = [s] \cdot [VL_{G012}] \quad (2.20)$$

Donde:

$$[s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

A su vez se puede calcular usando la *ecuación 2.20*, los voltajes de secuencia de línea a tierra:

$$[VL_{G012}] = [s]^{-1} \cdot [VL_{abc-g}] \quad (2.21)$$

Siendo:

$$[s]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Al igual que las corrientes de línea de fase se definen de la misma manera:

$$[I_{abc}] = [s] \cdot [I_{012}] \quad (2.22)$$

La matriz de secuencia se determina de la siguiente manera. [17]

$$Z_s = S^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot S \quad (2.23)$$

Donde:

$$Z_{abc} = Z_{11} - \frac{1}{Z_{22}} \cdot (Z_{12}) \cdot (Z_{21}) \quad (2.24)$$

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Donde:

Z_{00} = Impedancia de secuencia cero

Z_{11} = Impedancia de secuencia positiva

Z_{22} = Impedancia de secuencia negativa

2.5. Flujo de Potencia o Carga, Caída de voltaje y Perdida de potencia.

En el sistema eléctrico de potencia el transporte y distribución deben ser puntos muy importantes a ser analizados para la planificación, diseño y operación ante variaciones de carga, debido a que existen perdidas de energía en estas etapas de transporte. [20] Siendo así un tema a estudiar como los flujos de potencia que permiten verificar y tomar decisiones por parte de la empresa distribuidora, con el fin de mejorar el sistema de distribución.[21]

En la red de bajo voltaje dichas perdidas se van dando en los tramos que componen la red, debido a que existen un nodo de envío (i) y un nodo de recibo (j), este trayecto está compuesto por un conductor la cual tiene una impedancia que a su vez afecta el paso de la corriente y el nivel de voltaje.

De esta manera los flujos de potencia permiten determinar cuáles son las condiciones de la red de distribución y así garantizar que los niveles de voltaje estén acordes a lo establecido para el consumo, ya sea en el sector: residencial, comercial e industrial.

2.5.1. Caída de Voltaje.

La caída de voltaje se da de acuerdo a las topologías de las redes, las mismas que si no han sido analizadas previamente, provocan una deficiencia en la calidad de energía eléctrica causando daños a las cargas conectadas.

Tabla 1. Expresiones para calcular las caídas de voltaje.
Fuente:[17],[22].

Circuito tipo	Expresiones para calcular las caídas de voltaje.	
	En Voltios	En Porcentaje
3F de 3 y 4 hilos	$\Delta U_{ij} = \frac{DM_{ij}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom.}} \cdot l_{ij} \cdot M_{ij}$	$\% \Delta U_{ij} = \frac{DM_{ij}}{10 \cdot U_{nom.}^2} \cdot l_{ij} \cdot M_{ij}$
1F L-L (Δ)	$\Delta U_{AB-ij} = 2 \cdot \frac{DM_{ij}}{U_{AB-nom.}} \cdot l_{ij} \cdot M_{ij}$	$\% \Delta U_{AB-ij} = 2 \cdot \frac{DM_{ij}}{10 \cdot U_{nom.}^2} \cdot l_{ij} \cdot M_{ij}$
1F L-n (Y)	$\Delta U_{ij} = \sqrt{3} \cdot \frac{DM_{ij}}{U_{nom.}} \cdot l_{ij} \cdot M_{ij}$	$\% \Delta U_{Fn-ij} = 3 \cdot \frac{DM_{ij}}{10 \cdot U_{nom.}^2} \cdot l_{ij} \cdot M_{ij}$
2F-n (Carga 1F balanc.)	$\Delta U_{Fn-ij} = \frac{\sqrt{3} \cdot DM_{ij}}{2 \cdot U_{nom.}} \cdot l_{ij} \cdot M_{2Fn-ij}$	$\% \Delta U_{Fn-ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{DM_{ij}}{10 \cdot U_{nom.}^2} \cdot l_{ij} \cdot M_{2Fn-ij}$
2F-n (Carga 3F balanc.)	$\Delta U_{Fn-ij} = \frac{DM_{ij}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom.}} \cdot l_{ij} \cdot M'_{2Fn-ij}$	$\% \Delta U_{Fn-ij} = \frac{DM_{ij}}{10 \cdot U_{nom.}^2} \cdot l_{ij} \cdot M'_{2Fn-ij}$

D =Demanda.

$U_{nom.}$ =Voltaje nominal.

l_{ij} = Longitud del vano.

M_{ij} = Parámetro M.

ΔU_{ij} =Caída de voltaje en el tramo.

2.5.2. Pérdida de Potencia.

La pérdida de potencia activa hace referencia al gasto económico del sistema, es decir que la línea (conductor) no se está entregando al consumidor final la potencia enviada, ya que esta se está disipando en el proceso de transporte del suministro, debido a las características que la red o el conductor que tenga en el sistema.

Tabla 2. Expresiones para calcular pérdidas de potencia activa.
Fuente:[17],[22].

Circuito tipo	Expresiones para calcular pérdidas en kW.
3F de 3 y 4 hilos	$\Delta P_{3F-ij} = \left(\frac{DM_{ij}}{U_{nom.}} \right)^2 \cdot l_{ij} \cdot r_{ij} \cdot 10^{-3}$
1F L-L (Δ)	$\Delta P_{1F-L-Lij} = 2 \cdot \left(\frac{DM_{IF-ij}}{U_{nom.}} \right)^2 \cdot l_{ij} \cdot r_{ij} \cdot 10^{-3}$
1F L-n (Y)	$\Delta P_{1FLn-ij} = 3 \cdot \left(\frac{DM_{IF-ij}}{U_{nom.}} \right)^2 \cdot r_{Eq-ij} \cdot l_{ij} \cdot 10^{-3}$
2F-n carga monofásica total	$\Delta P_{2Fn-IF} = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{DM_{IF-ij-Total}}{U_{nom.}} \right)^2 \cdot (r_A + r_B + r_n) \cdot l_{ij} \cdot 10^{-3}$
2F-n carga monofásica de una fase	$\Delta P_{2Fn-IF} = 3 \cdot \left(\frac{DM_{ij-Fn}}{U_{nom.}} \right)^2 \cdot (r_A + r_B + r_n) \cdot l_{ij} \cdot 10^{-3}$
2F-n carga trifásica	$\Delta P_{2Fn-3F} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{DM_{ij-3F}}{U_{nom.}} \right)^2 \cdot (2r_F + r_n)_{ij} \cdot l_{ij} \cdot 10^{-3}$

r_{ij} = Valor real de impedancia del conductor.

$r_A + r_B + r_n$ = Valor real de impedancia de los conductores de fases.

ΔP_{ij} = Pérdida de potencia en el tramo.

Tabla 3. Expresiones para calcular el parámetro M.
Fuente: [17].

Circuito tipo	Parámetro M en Ω/km
3F de 3 y 4 hilos	$M_{ij} = (r \cdot \cos\phi + x \cdot \sen\phi)_{ij}$
1F L-L (Δ)	$M_{ij} = (r \cdot \cos\phi + x \cdot \sen\phi)_{ij}$
1F L-n (Y)	$M_{ij} = (r \cdot \cos\phi + x \cdot \sen\phi)_{ij}$
2F-n (Carga 1F balanc.)	$M_{2F-n} = \{r[\cos\phi + \cos(60 + \phi)] + x[\sen\phi + \sen(60 + \phi)]\}$
2F-n (Carga 3F balanc.)	$M'_{2F-n} = \{r[\cos\phi + \sqrt{3}\cos(\phi - 30)] + x[\sen\phi + \sqrt{3}\sen(\phi - 30)]\}$

r, x = Valor de impedancia del conductor

2.6. Método de Ardivinson.

Este método es uno de los más usados en los sistemas de distribución, el cual mediante el ingreso de datos medidos de potencia permite obtener caída de voltaje y pérdida de potencia en cada tramo de la red.[21]

Este método toma en consideración suposiciones que se detallan:[21],[23]

- El factor de potencia es uniforme para todo el circuito.
- El factor de capacidad es uniforme en todos los transformadores.
- Las cargas máximas y mínimas son coincidentes en todo el circuito.
- Las cargas están balanceadas en las tres fases.

A continuación, las expresiones para la resolución de flujos de potencia: [23],[24]

$$P_{ri} = P_i + \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \left[P_j + \left(\frac{S(t)_j}{U_n} \right)^2 r_{ij} L_{ij} 10^{-3} \right] \quad (kW) \quad (2.26)$$

$$Q_{ri} = Q_i + \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \left[Q_j + \left(\frac{S(t)_j}{U_n} \right)^2 x_{ij} L_{ij} 10^{-3} \right] \quad (kUAR) \quad (2.27)$$

$$U_{ri} = U_i - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \left[U_n - \left(\frac{P_i r_{ij} + Q_i x_{ij}}{U_n} + j \frac{P_i x_{ij} + Q_i r_{ij}}{U_n} \right) L_{ij} 10^{-3} \right] \quad (U) \quad (2.28)$$

Donde:

- a_{ij} = Es el coeficiente de la matriz topológica.
- U_n = Voltaje nominal en $[kU]$.
- U_{ri} =Voltaje de recibo del nodo i en $[kU]$.
- P_i = Potencia activa trifásica de envío del nodo i en $[kW]$.
- P_j = Potencia activa trifásica de recibo en el nodo j en $[kW]$.
- Q_i = Potencia reactiva trifásica de envío del nodo i en $[kUAR]$.
- Q_j = Potencia reactiva trifásica de recibo del nodo j en $[kUAR]$.
- $Z_{ij} = r_{ij} + x_{ij} =$ Impedancia de línea en $[\Omega/Km \text{ o } \Omega/Milla]$.
- $L_{ij} =$ Longitud de tramo ij dada en $[Km \text{ o } Millas]$.
- $S(t)_j$ = Potencia aparente trifásica de recibo del nodo j en $[kUA]$.

A continuación el Desarrollo del Método: [23],[24]

Iteración 1.

- Con el valor de $P_{ni}^{(1)}$ de envío, se determina el recibo $P_{nj}^{(1)}, \Delta U_{nij}^{(1)}, \Delta P_{nij}^{(1)}$ en función de $S_{nj}^{(1)}$.

Iteración 2.

- Considerando $P_{ni}^{(2)} = P_{ni}^{(1)} + \Delta P_{nij}^{(1)}$ se determina $P_{nj}^{(2)}, \Delta U_{nij}^{(2)}, \Delta P_{nij}^{(2)}$ en función de $S_{nj}^{(2)}$, y un error $\varepsilon U_{dif}^{(2)} = \Delta U_{nij}^{(2)} - \Delta U_{nij}^{(1)}$ para ΔU y ΔP por transporte de energía $\varepsilon P_{dif}^{(2)} = \Delta P_{nij}^{(2)} - \Delta P_{nij}^{(1)}$.

Iteración 3.

- Considerando $P_{ni}^{(3)} = P_{ni}^{(2)} + \Delta P_{nij}^{(2)}$ se determina $P_{nj}^{(3)}, \Delta U_{nij}^{(3)}, \Delta P_{nij}^{(3)}$ en función de $S_{nj}^{(3)}$, y un error $\varepsilon U_{dif}^{(3)} = \Delta U_{nij}^{(3)} - \Delta U_{nij}^{(2)}$ para ΔU y ΔP por transporte de energía $\varepsilon P_{dif}^{(3)} = \Delta P_{nij}^{(3)} - \Delta P_{nij}^{(2)}$.

En la iteración n-ésima.

- Se realiza el mismo cálculo, hasta obtener un valor de error aceptable.

2.7. Mejoras Técnicas en Red de Distribución.

Las mejoras técnicas están direccionadas a la reconfiguración de las redes, con el fin de garantizar el suministro eléctrico en el futuro, manteniendo la calidad y seguridad requerida para la distribución.

Al realizar las modificaciones en la red, implica un capital económico que las empresas deben tener en caja para llevar a cabo la obra. Para determinar la factibilidad de la inversión se realiza un estudio económico que permita tomar decisiones: Valor actual neto (VAN), Tasa Interno de Retorno (TIR), y Razón Beneficio Costo (RBC). [21]

2.8. Indicadores de Rentabilidad.

2.8.1. Valor Actual Neto (VAN).

Este indicador permite determinar los ingresos y egresos futuros de un proyecto. Todo el análisis que se realiza y el resultado que da el VAN es durante el tiempo de vida útil del proyecto, si el VAN es positivo quiere decir que es viable y si es negativo indica que no es propicio su inversión.[25],[26]

$$\text{VAN} = \sum_{t=0}^{t=T_a} \frac{T_a \sum_{i=1}^{j=n} a_{ij}^n (\Delta P_{01ij} - \Delta P_{02ij}) (C_p T_e + 2,2(F_{02} - F_{01}) \sum_{i=1}^{j=n} L_{ij}) - 2,2(F_{02} - F_{01}) \sum_{i=1}^{j=n} L_{ij}}{T_a (1+r_i)^t} \quad (2.29)$$

Donde:

- $\sum_{i=1}^{j=n} \Delta P_{01ij}$ pérdidas activas, existente [kW].
- $\sum_{i=1}^{j=n} \Delta P_{02ij}$ pérdidas activas, proyectado [kW].
- C_p costo de energía [USD/kW/h].
- T_e tiempo del sistema en funcionamiento continuo anual [horas].
- F_{01} fondo de inversión de SEP existente: material y mano de obra calificada [USD/km].
- F_{02} fondo de inversión de SEP proyectado: material y mano de obra calificada [USD/km].
- $\sum_{i=1}^{j=n} L_{ij}$ longitud total de SEP [km].
- r_i tasa pasiva [%].
- a_{ij}^n proviene de la transpuesta de la matriz de incidencia.
- T_a tiempo de vida útil del proyecto [años].

2.8.2. Análisis Beneficio-Costo (RBC).

Mediante este indicador se puede determinar si existen o no beneficios al invertir en un proyecto, el mismo que se obtiene al dividir el beneficio para el costo, [24], [26]

$$\text{RBC} = \sum_{t=0}^{t=T_a} \frac{T_a \sum_{i=1}^{j=n} a_{ij}^n (\Delta P_{01ij} - \Delta P_{02ij}) (C_p T_e + 2,2(F_{02} - F_{01}) \sum_{i=1}^{j=n} L_{ij})}{2,2(F_{02} - F_{01}) \sum_{i=1}^{j=n} L_{ij}} \quad (2.30)$$

Los siguientes criterios de decisión:

- Si $RBC > 1$: Existe beneficio ante una inversión.
- Si $RBC = 1$: Indica que no existe ganancia.
- Si $RBC < 1$: Indica que no existe beneficio.

CAPÍTULO 3

ELABORACIÓN DE GRAFO Y METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN.

Para la aplicación de la metodología se parte de una red existente, el cual permite recopilar datos del mismo, luego se realiza un despliegue (mallado) en la red para la aplicación de la metodología.

3.1. Información de la Red de Distribución.

La recopilación de datos se obtiene de la página de la CENTROSUR, como: distancia de vanos, nivel de voltaje, configuración del circuito, la carga que tiene cada poste se determina mediante el tipo de estrato residencial (C, D, E).

El modelado de las líneas es determinado según características topológicas: conductor, estructura de la red, la configuración del circuito (*monofásico, bifásico, trifásico*).

3.2. Elaboración de Grafo en el Sistema de Distribución (SD).

Los grafos están compuestos por: vértices (*nodo*), enlaces (*tramo*) y dirección (\rightarrow) para aplicar en redes eléctricas, como se representa a continuación.

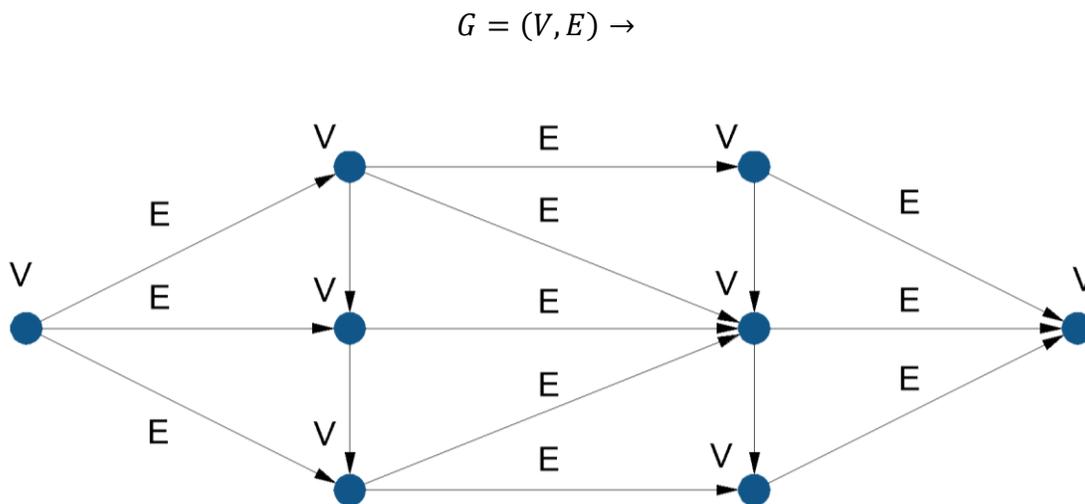


Figura 13. Elaboración de grafo.
Fuente: Autores.

Cuando los enlaces tienen un sentido definido se le conoce como grafo dirigido.

Algunos aspectos a considerar para elaborar un grafo:

- Determinar el punto de inicio (*posición del transformador*).
- Dar un peso a cada nodo (*numerar*).
- Determinar el sentido de los enlaces.

3.3. Función Objetivo.

La función objetivo es la longitud (L_{ij}), siendo la distancia que existe en cada tramo (*enlace*) de la red de distribución, donde cada nodo tiene coordenadas (x, y)

Además, está sujeta a restricción de dirección que debe tener el flujo de potencia en cada tramo (nodo $i <$ nodo j).

$$FO = \sum_{i,j}^n L_{ij} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} ; (m) \quad (3.1)$$

Donde:

$FO =$ Función Objetivo

$L =$ Longitud del Tramo

$x_1; y_1 =$ Punto inicial

$X_2; y_2 =$ Punto final

3.4. Metodología para la Optimización.

Para realizar este proyecto se parte de un sistema de distribución en bajo voltaje, se obtiene la representación gráfica como: configuración, ramales, nivel de voltaje, mediante estos datos se puede implementar esta metodología.

Para un mejor entendimiento la red se divide en etapas o secciones, en donde están los postes (nodos) a ser analizados, esto va a depender de cómo se quiere organizar en la red.

A continuación, se presenta los pasos que se llevara a cabo para este proyecto:

- a. Recopilar la información obtenida del área a ser analizada, como: distancias, cantidad de postes, configuración de líneas, entre otros.

- b. Una vez obtenido los datos se designa los puntos (postes) como nodos de la red.
- c. Con la designación de nodos se dibuja la red de distribución de forma lineal para un mejor entendimiento.
- d. Como el sistema o red es radial, para aplicar el algoritmo GWO se procede a realizar un mallado dentro del grafo.
- e. Al aplicar el algoritmo se tendrá nuevos caminos para el servicio eléctrico y por ende una configuración distinta a la topología original.
- f. Se realiza el análisis LCK en los ramales que tenga el sistema.
- g. Una vez analizado las restricciones se realiza el análisis de flujos de potencia, el cual permitirá determinar que las caídas de voltaje estén dentro de los límites permitidos para zonas urbanas (6%) y rurales (4.5%).
- h. Finalmente se realiza el análisis costo-beneficio de la red a implementar.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

Para la aplicación de la metodología, se ensaya en redes de distribución existentes.

4.1. Área Propuesta1 (AP1).

El área propuesta comprende la topología de red de distribución.

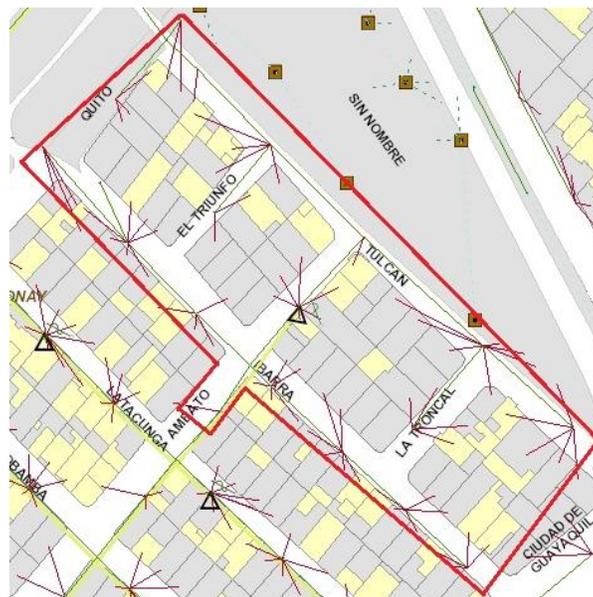


Figura 14. Área Propuesta1.
Fuente: CentroSur (Geoportal).

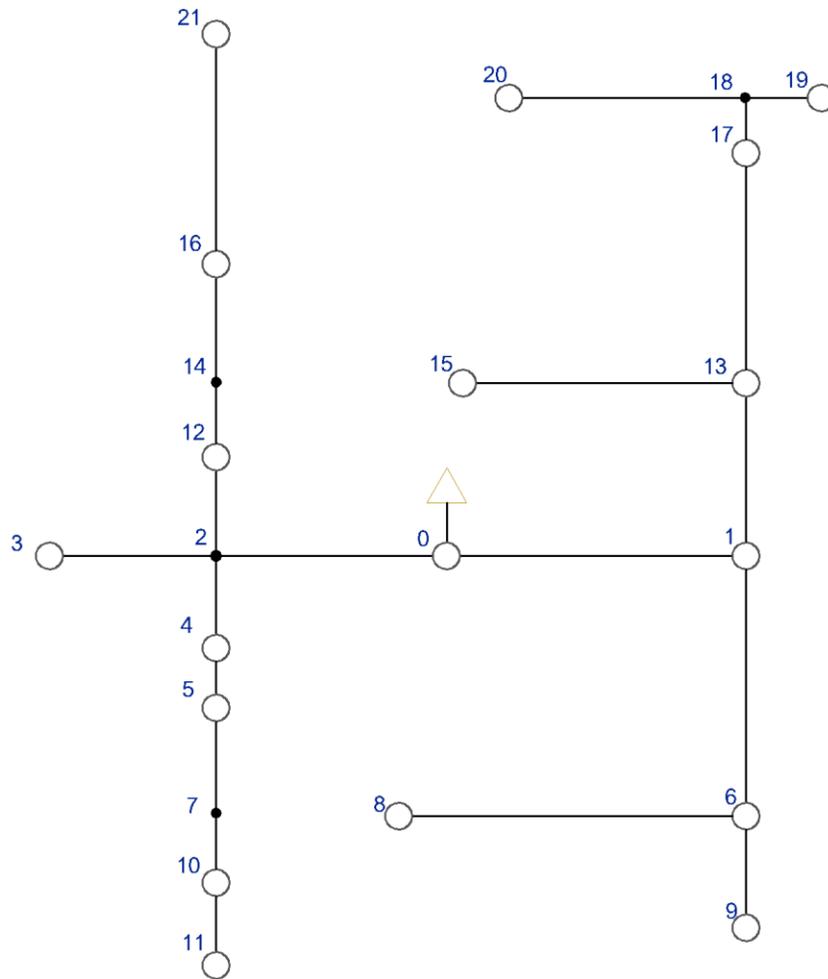
Información de la red propuesta 1:

Tabla 4. Datos de la red existente.

Nodo i	Nodo j	Lij[m]	Usuarios	Configuración	Calibre (F-N)
0	1	28,16	7	2F3C	2-4
0	2	21,75	1	2F3C	2-4
2	3	15,70	1	2F3C	2-4
2	4	8,70	4	2F3C	2-4
4	5	27,88	6	2F3C	2-4
1	6	46,72	7	2F3C	2-4
5	7	11,04	1	2F3C	2-4
6	8	32,70	4	2F3C	2-4
6	9	35,40	5	2F3C	2-4
7	10	13,87	4	2F3C	2-4
10	11	24,34	4	2F3C	2-4
2	12	21,71	4	2F3C	2-4
1	13	40,18	4	2F3C	2-4
12	14	15,70	1	2F3C	2-4
13	15	28,35	1	2F3C	2-4
14	16	12,51	7	2F3C	2-4
13	17	28,52	1	2F3C	2-4
17	18	12,38	1	2F3C	2-4
18	19	7,16	1	2F3C	2-4
18	20	21,98	3	2F3C	2-4
16	21	37,18	3	2F3C	2-4

4.1.1. Red existente AP1.

Obtenido la red de distribución en BV, se obtiene el grafo con la numeración de los postes como nodos.



*Figura 15. Sistema radial AP1.
Fuente: Autores.*

4.1.2. Flujo de Potencia de red existente.

El flujo de Potencia permite determinar: potencias de envío y recibo, caídas de voltaje entre nodos (vanos), de envío y recibo, factor de potencia en subestación (transformador) entre otros.

Tabla 5. Flujo de potencia de red existente.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij (m)	Lj (m)	ΔP_j (kW)	S(t)i (kVA)	ΔV_j (V)	ΔV (%)
0	1	28,17	28,17	0,030	6,973	1,433	0,597
0	2	21,75	21,75	0,001	1,650	0,261	0,109
2	3	15,71	37,46	0,009	1,659	0,452	0,188
2	4	8,70	30,45	0,026	4,641	0,556	0,232
4	5	27,88	58,33	0,202	6,352	1,869	0,779
1	6	46,72	74,89	0,333	7,360	4,001	1,667
5	7	11,04	69,37	0,324	2,069	2,050	0,854
6	8	32,71	107,59	0,945	5,835	5,515	2,298
6	9	35,40	110,29	1,080	6,960	5,949	2,479
7	10	13,87	83,24	0,739	5,563	2,653	1,105
10	11	24,34	107,58	1,706	6,854	4,029	1,679
2	12	21,71	43,46	0,037	4,655	1,000	0,417
1	13	40,18	68,35	0,207	4,872	2,893	1,205
12	14	15,70	59,16	0,083	1,754	1,206	0,503
13	15	28,35	96,70	0,411	2,184	3,390	1,413
14	16	12,52	71,68	0,371	7,409	1,901	0,792
13	17	28,53	96,88	0,412	2,185	3,394	1,414
17	18	12,38	109,26	0,643	2,496	3,649	1,521
18	19	7,16	116,42	0,945	2,907	3,826	1,594
18	20	21,99	131,25	1,360	5,414	4,632	1,930
16	21	37,19	108,86	0,974	4,896	3,370	1,404

Tabla 6. Flujo de potencia total de red existente API.

Denominación	Cantidad	Unidad
S(t)	94,50	(kVA)
P(t)	87,36	(kW)
Q(t)	36,06	(kVAr)
Fp	0,92	---

Se realiza el despliegue de la red (*mallado*), con el fin de comprobar en lo posterior cuales son vanos proyectados o existentes en su despliegue para su implementación (color rojo vanos proyectados).

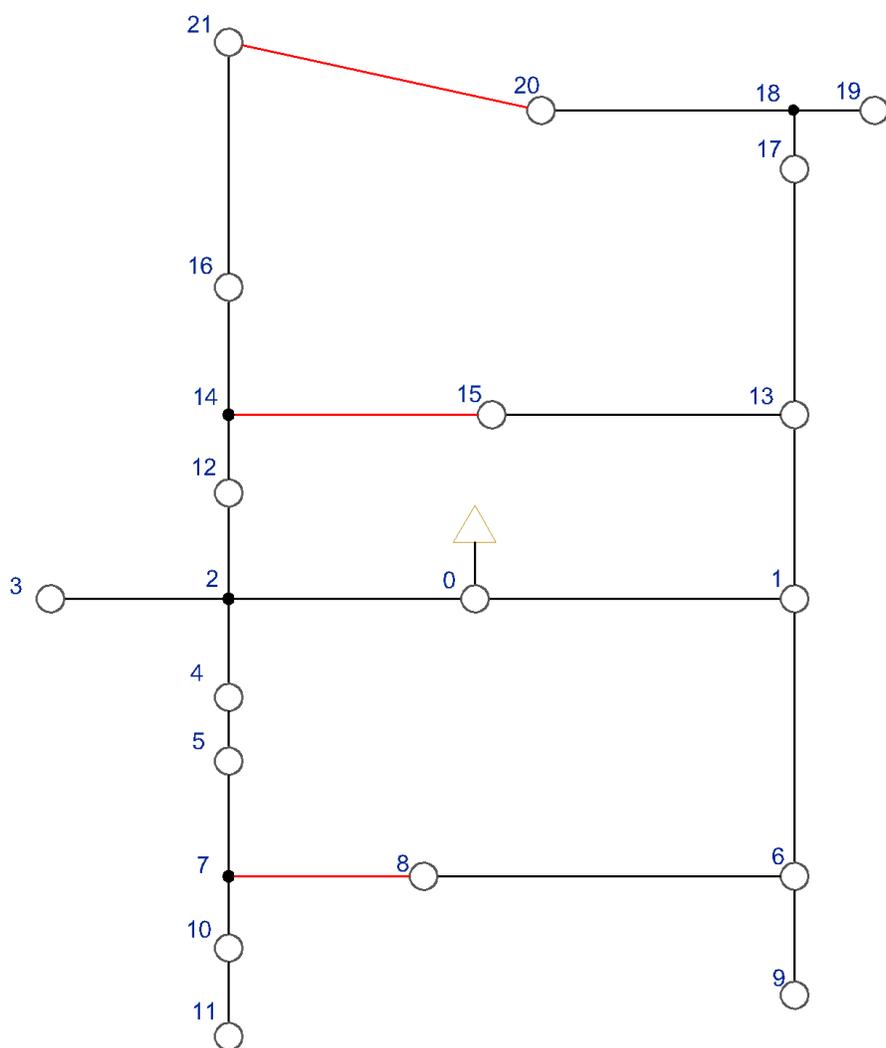


Figura 16. Despliegue de red en API.
Fuente: Autores.

4.1.3. Optimización de la red.

Se expone los resultados de distancia de algunos de los tramos optimizados en la red:

Tabla 7. Resultados de la optimización API.

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L[m]</i>
0	1	28,17
1	2	40,18
2	3	28,53
3	4	12,38
4	5	21,99
4	6	7,16
1	7	46,72
7	8	35,40
0	9	21,75
9	10	21,71
10	11	15,70
11	12	12,52
12	13	37,19
11	14	23,41
9	15	15,71
9	16	8,70
16	17	27,88
17	18	11,04
18	19	13,87
19	20	24,34
18	21	17,91

El proceso de búsqueda (*flecha verde representa la etapa de rodeo del modelo GWO*) de la metodología:

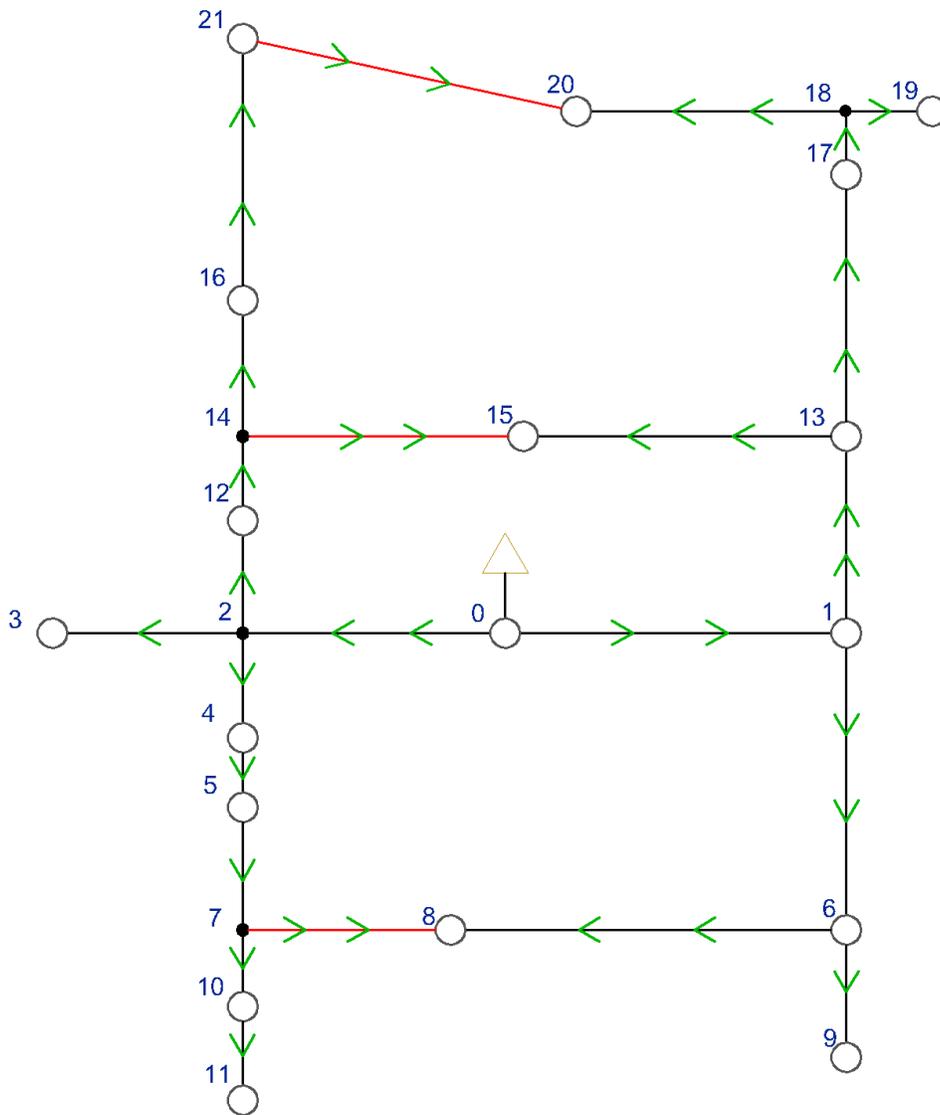


Figura 17. Proceso de búsqueda API.
Fuente: Autores.

En la red optimizada de la *Figura 18*, las líneas de color verde representan los nuevos despliegues.

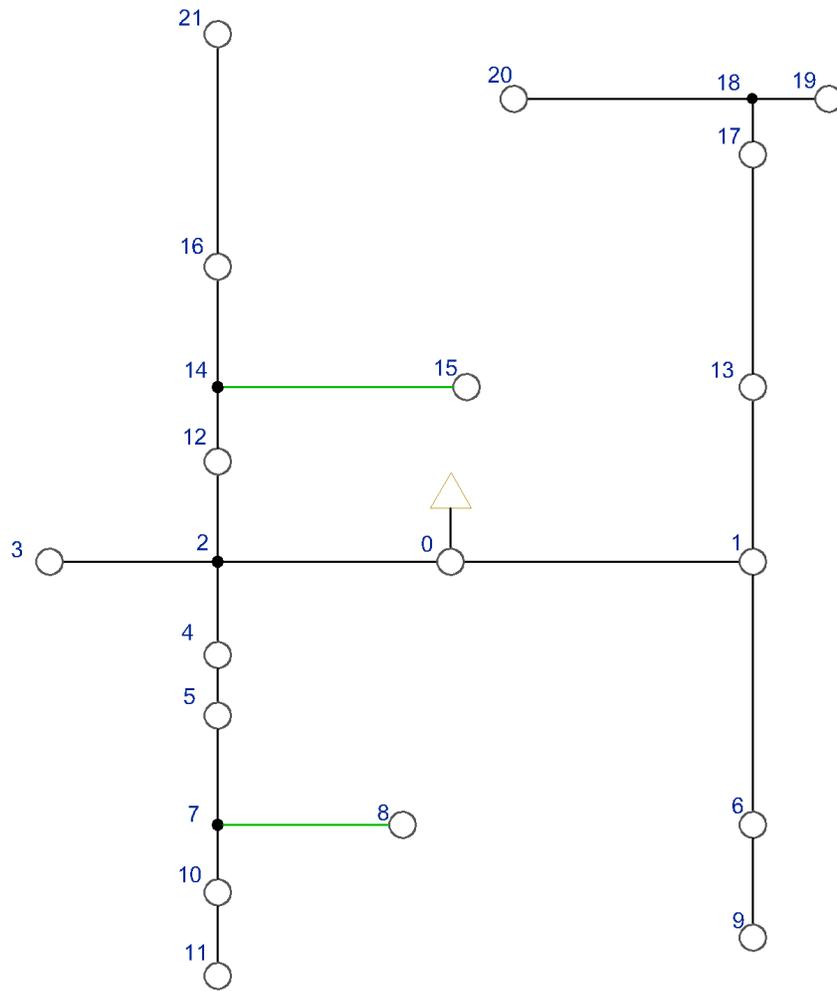


Figura 18. Red Optimizada API.
Fuente: Autores.

Se expone la topología fruto del modelo GWO luego de la etapa de caza, que para el caso los nodos 8 y 15 son los que tienen un nuevo despliegue en la red.

Se renumera la red optimizada y se identifica el ramal trocal (*principal*) de acuerdo a la mayor longitud que para el caso va desde 0 a 5, para su posterior análisis.

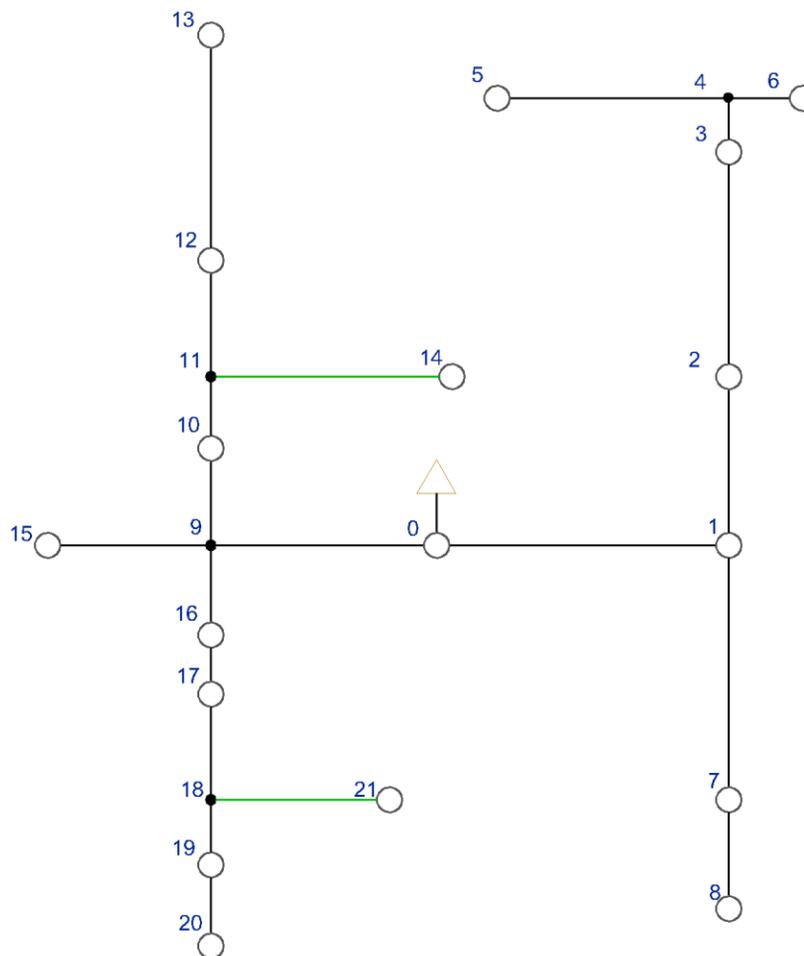
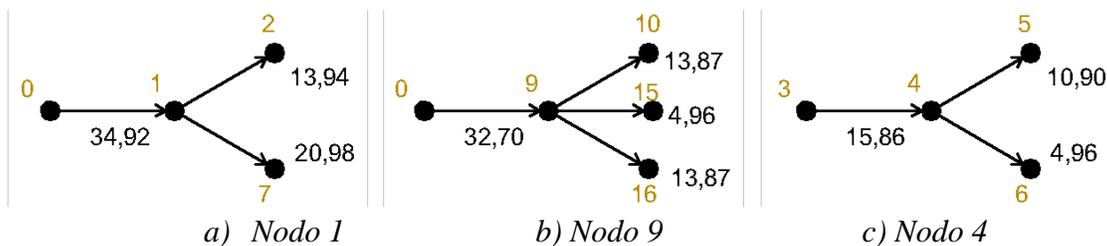


Figura 19. Asignación numérica a los nodos de la red optimizada API.
Fuente: Autores.

Se procede a verificar las condiciones de LCK en los ramales que tengan bifurcaciones como un criterio de restricción a cumplir.



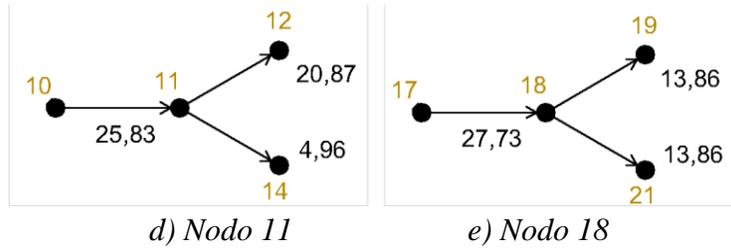


Figura 20. Análisis de corrientes en ramales.

Fuente: Autores.

Tabla 8. Resultados de corrientes en ramales.

ni	nj	ΔV_{nij}	ΔV_{nj}	ΔV_{nij}	ΔV_j	I_{nij}	I_{nj}
		V	V	%	%	A	A
0	1	1,422	1,422	0,592	0,592	---	34,92
1	2	1,348	2,770	0,562	1,154	13,94	---
2	3	0,342	3,112	0,143	1,297	---	---
3	4	0,149	3,260	0,062	1,358	---	15,86
4	5	0,580	3,840	0,242	1,600	10,90	---
4	6	0,086	3,346	0,036	1,394	4,96	---
1	7	2,359	3,781	0,983	1,575	20,98	---
7	8	1,432	5,213	0,597	2,172	---	---
0	9	0,261	0,261	0,109	0,109	---	32,70
9	10	0,728	0,989	0,303	0,412	13,87	---
10	11	0,188	1,177	0,078	0,491	---	25,83
11	12	0,632	1,809	0,263	0,754	20,87	---
12	13	0,981	2,790	0,409	1,163	---	---
11	14	0,281	1,458	0,117	0,608	4,96	---
9	15	0,188	0,449	0,078	0,187	4,96	---
9	16	0,292	0,553	0,122	0,230	13,87	---
16	17	1,237	1,790	0,515	0,746	---	---
17	18	0,132	1,922	0,055	0,801	---	27,73
18	19	0,465	2,387	0,194	0,995	13,86	---
19	20	0,816	3,204	0,340	1,335	---	---
18	21	0,601	2,523	0,250	1,051	13,86	---

A continuación, el análisis de flujos de potencia de la red optimizada:

Tabla 9. Flujo de potencia de red Optimizada API.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij (m)	Lj (m)	ΔP_j (kW)	S(tj) (kVA)	ΔV_j (V)	ΔV (%)
0	1	28,17	28,17	0,030	6,973	1,433	0,597
1	2	40,18	68,35	0,207	4,872	2,893	1,205
2	3	28,53	96,88	0,412	2,185	3,394	1,414
3	4	12,38	109,26	0,643	2,496	3,649	1,521
4	5	21,99	131,25	1,360	5,414	4,632	1,930
4	6	7,16	116,42	0,945	2,907	3,826	1,594
1	7	46,72	74,89	0,333	7,360	4,001	1,667
7	8	35,40	110,29	1,080	6,960	5,949	2,479
0	9	21,75	21,75	0,001	1,650	0,261	0,109
9	10	21,71	43,46	0,037	4,655	1,000	0,417
10	11	15,70	59,16	0,083	1,754	1,206	0,503
11	12	12,52	71,68	0,371	7,409	1,901	0,792
12	13	37,19	108,86	0,974	4,896	3,370	1,404
11	14	23,41	82,57	0,176	1,874	1,543	0,643
9	15	15,71	37,46	0,009	1,659	0,452	0,188
9	16	8,70	30,45	0,026	4,641	0,556	0,232
16	17	27,88	58,33	0,202	6,352	1,869	0,779
17	18	11,04	69,37	0,324	2,069	2,050	0,854
18	19	13,87	83,24	0,739	5,563	2,653	1,105
19	20	24,34	107,58	1,706	6,854	4,029	1,679
18	21	17,91	87,28	0,779	5,615	2,838	1,183

Tabla 10. Flujo de potencia total de red optimizada.

Denominación	Cantidad	Unidad
S(t)	93,98	(kVA)
P(t)	86,96	(kW)
Q(t)	35,65	(kVAr)
Fp	0,93	---

4.1.4. Análisis Económico.

El análisis económico permite determinar la rentabilidad de realizar una modificación en la red, mediante el indicador de razón beneficio costo (RBC).

Tabla 11. Análisis RBC para API.

Año	Red Existente			Red Proyectada			(1+ri) t	Beneficio (USD)	Costo (USD)	VAN
	S(t) (kVA)	ΔP (kW)	Ka ΔP (USD)	ΔP (kW)	Ka ΔP (USD)					
0	93,98	0,2820	325,76	0,178	247,10	1	78,66	110,91	-32,252	
1	97,88	0,3059	353,36	0,193	268,04	1,048	81,42	105,83	-24,415	
2	101,94	0,3319	383,30	0,209	290,74	1,098	84,27	100,98	-16,715	
3	106,17	0,3600	415,77	0,227	315,38	1,151	87,22	96,36	-9,137	
4	110,58	0,3905	450,99	0,246	342,10	1,206	90,28	91,95	-1,668	
5	115,17	0,4235	489,20	0,267	371,08	1,264	93,44	87,73	5,707	
6	119,95	0,4594	530,65	0,290	402,52	1,325	96,72	83,72	12,999	
7	124,93	0,4984	575,61	0,314	436,62	1,388	100,10	79,88	20,223	
8	130,11	0,5406	624,38	0,341	473,61	1,455	103,61	76,22	27,389	
9	135,51	0,5864	677,27	0,370	513,74	1,525	107,24	72,73	34,511	
10	141,13	0,6361	734,65	0,401	557,26	1,598	111,00	69,40	41,600	
11	146,99	0,6899	796,90	0,435	604,47	1,675	114,89	66,22	48,668	
12	153,09	0,7484	864,41	0,472	655,69	1,755	118,92	63,19	55,727	
13	159,44	0,8118	937,64	0,512	711,24	1,839	123,08	60,29	62,788	
14	166,06	0,8806	1017,08	0,555	771,49	1,928	127,39	57,53	69,862	
15	172,95	0,9552	1103,25	0,602	836,86	2,020	131,86	54,90	76,961	

Del análisis económico se determina que el VAN es positivo desde el segundo trimestre del quinto año, así obtenido un RBC de 1,291.

4.2. Área Propuesta 2 (AP2).

El área propuesta para el análisis con la topología.



Figura 21. Área Propuesta 2.
Fuente: CentroSur (Geoportal)

Una vez obtenido el área propuesta de estudio se presenta los posibles despliegues (rojo) en la red existente:

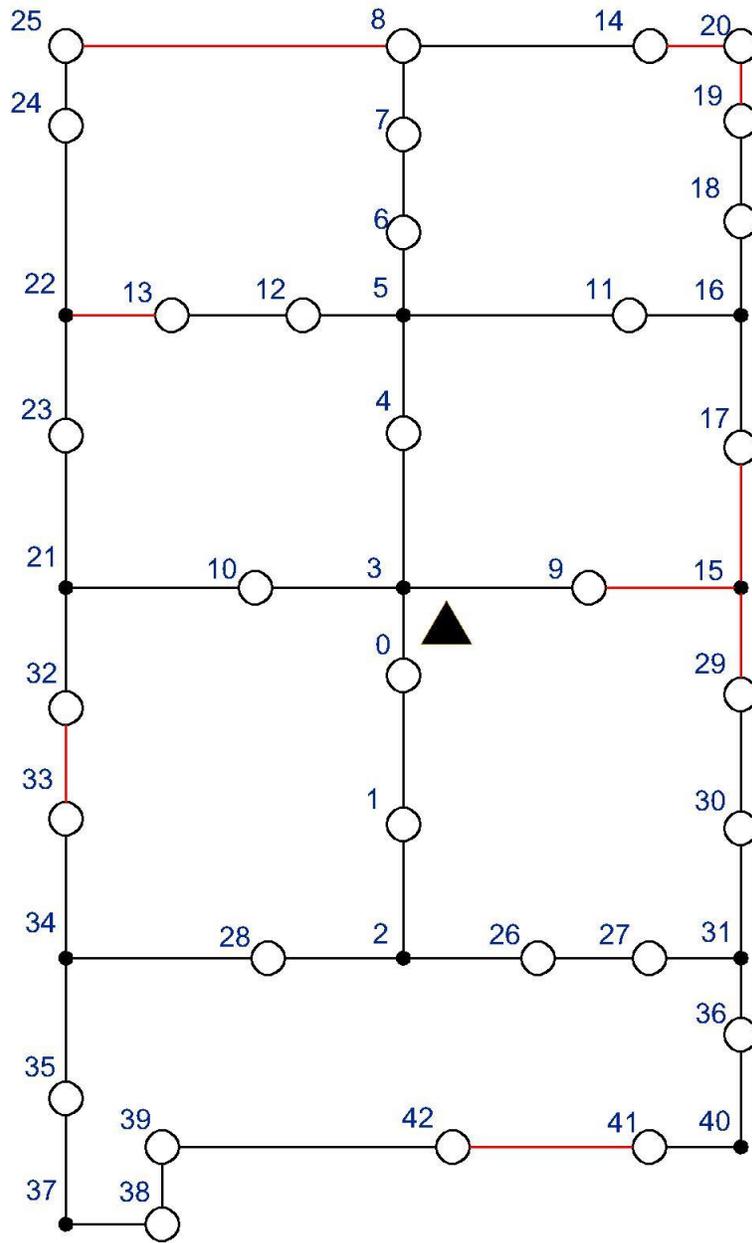


Figura 22. Despliegue de red en AP2.
Fuente: Autores.

Datos de la red y sus despliegues tentativos:

Tabla 12. Datos de red y sus posibles caminos para AP2.

Nodo “i”	Nodo “j”	Lij [m]	Usuarios	Configuración	Calibre (F-N)
0	1	36,583	3	3F4C	1/0-2
1	2	10,345	1	3F4C	1/0-2
0	3	8,766	1	3F4C	1/0-2
3	4	29,836	10	3F4C	1/0-2
4	5	30,704	1	3F4C	1/0-2
5	6	4,460	3	3F4C	1/0-2
6	7	31,579	8	3F4C	1/0-2
7	8	33,208	12	3F4C	1/0-2
3	9	24,165	1	3F4C	1/0-2
3	10	14,550	1	3F4C	1/0-2
5	11	29,300	1	3F4C	1/0-2
5	12	10,332	1	3F4C	1/0-2
12	13	23,852	1	3F4C	1/0-2
8	14	33,709	4	3F4C	1/0-2
11	16	21,338	1	3F4C	1/0-2
16	17	25,448	9	3F4C	1/0-2
16	18	17,576	6	3F4C	1/0-2
18	19	40,072	7	3F4C	1/0-2
10	21	25,236	1	3F4C	1/0-2
22	23	35,554	3	3F4C	1/0-2
22	24	36,371	5	3F4C	1/0-2
24	25	30,440	8	3F4C	1/0-2
2	26	11,337	11	3F4C	1/0-2
26	27	32,754	3	3F4C	1/0-2
2	28	20,565	1	3F4C	1/0-2
30	29	27,735	8	3F4C	1/0-2
31	30	11,718	1	3F4C	1/0-2
27	31	4,965	1	3F4C	1/0-2
21	32	10,689	7	3F4C	1/0-2
34	33	11,493	11	3F4C	1/0-2
28	34	19,610	1	3F4C	1/0-2
34	35	41,349	3	3F4C	1/0-2
31	36	16,973	7	3F4C	1/0-2
35	37	18,489	1	3F4C	1/0-2
37	38	5,630	1	3F4C	1/0-2
38	39	10,623	2	3F4C	1/0-2
36	40	32,857	1	3F4C	1/0-2
40	41	7,343	9	3F4C	1/0-2
39	42	37,707	12	3F4C	1/0-2
21	23	29,606	6	3F4C	1/0-2

4.2.3. Optimización de la red.

Ingresado la información al modelo GWO sus resultados:

Tabla 13. Resultado de la optimización AP2.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij (m)
0	1	36,58
1	2	10,34
0	3	8,77
3	4	29,84
4	5	30,70
5	6	4,46
6	7	31,58
7	8	33,21
3	9	24,16
3	10	14,55
5	11	29,30
5	12	10,33
12	13	23,85
8	14	33,71
9	15	26,30
11	16	21,34
15	17	31,71
16	18	17,58
18	19	40,07
14	20	16,14
10	21	25,24
13	22	6,92
21	23	29,61
22	24	36,37

24	25	30,44
2	26	11,34
26	27	32,75
2	28	20,57
15	29	16,55
29	30	27,74
27	31	4,96
21	32	10,69
32	33	35,52
28	34	19,61
34	35	41,35
31	36	16,97
35	37	18,49
37	38	5,63
38	39	10,62
36	40	32,86
40	41	7,34
41	42	34,26

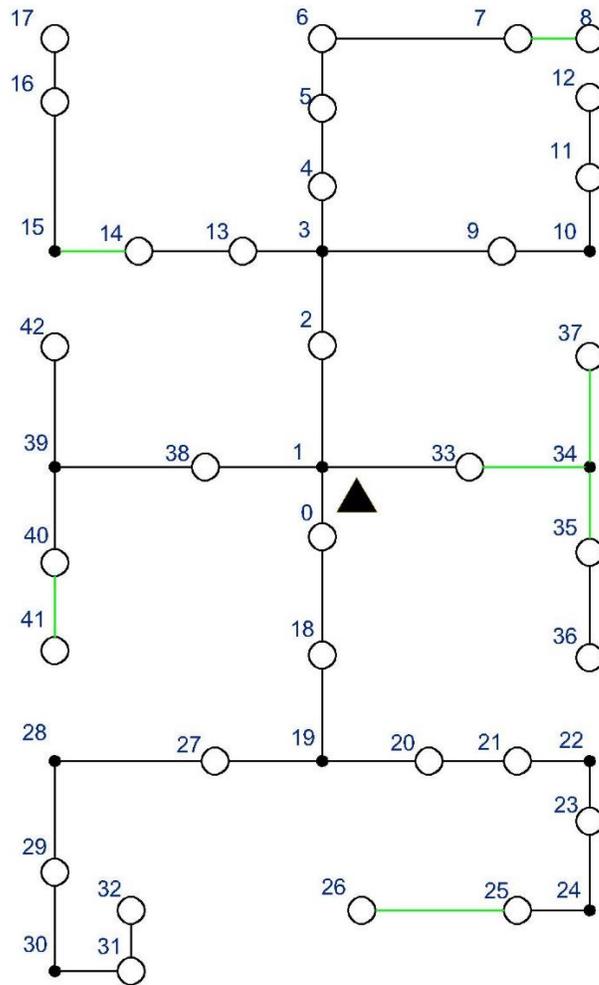


Figura 24. Asignación numérica a los nodos de la red optimizada AP2.
Fuente: Autores.

Se valida las condiciones de LCK en los ramales que tengan bifurcaciones.

Tabla 14. Resultado de corrientes en ramales.

n_i	n_j	$\Delta V_{n_{ij}}$	ΔV_{n_j}	$\Delta V_{n_{ij}}$	ΔV_j	$I_{n_{ij}}$	I_{n_j}
		V	V	%	%	A	A
0	1	0,040	0,040	0,017	0,017	---	38,23
1	2	0,778	0,818	0,324	0,341	28,32	---
2	3	0,140	0,958	0,058	0,399	---	20,82
3	4	0,045	1,003	0,019	0,418	10,90	---

4	5	0,680	1,683	0,283	0,701	---	---
5	6	1,013	2,696	0,422	1,123	---	---
6	7	0,430	3,126	0,179	1,302	---	---
7	8	0,074	3,200	0,031	1,333	---	---
3	9	0,134	1,092	0,056	0,455	4,96	---
9	10	0,097	1,189	0,041	0,496	---	---
10	11	0,297	1,486	0,124	0,619	---	---
11	12	0,677	2,163	0,282	0,901	---	---
3	13	0,047	1,005	0,020	0,419	4,96	---
13	14	0,109	1,114	0,045	0,464	---	---
14	15	0,069	1,184	0,029	0,493	---	---
15	16	0,560	1,744	0,233	0,727	---	---
16	17	0,656	2,400	0,273	1,000	---	---
0	18	0,367	0,367	0,153	0,153	---	---
18	19	0,047	0,414	0,020	0,173	---	35,68
19	20	0,321	0,735	0,134	0,306	30,73	---
20	21	0,329	1,064	0,137	0,443	---	---
21	22	0,023	1,087	0,009	0,453	---	---
22	23	0,326	1,413	0,136	0,589	---	---
23	24	0,150	1,563	0,062	0,651	---	---
24	25	0,175	1,738	0,073	0,724	---	---
25	26	1,045	2,782	0,435	1,159	---	---
19	27	0,094	0,508	0,039	0,212	4,96	---
27	28	0,090	0,598	0,037	0,249	---	---
28	29	0,415	1,013	0,173	0,422	---	---
29	30	0,084	1,097	0,035	0,457	---	---
30	31	0,026	1,123	0,011	0,468	---	---
31	32	0,077	1,200	0,032	0,500	---	---
1	33	0,110	0,150	0,046	0,063	4,96	---
33	34	0,120	0,270	0,050	0,113	---	46,79
34	35	0,356	0,627	0,149	0,261	23,39	---
35	36	0,127	0,753	0,053	0,314	---	---
34	37	0,683	0,953	0,285	0,397	23,39	---
1	38	0,066	0,106	0,028	0,044	4,96	---
38	39	0,115	0,222	0,048	0,092	---	39,21
39	40	0,205	0,427	0,086	0,178	20,87	---
40	41	1,005	1,432	0,419	0,597	---	---
39	42	0,500	0,722	0,208	0,301	18,34	---

Tabla 15. Flujo de potencia de red Optimizada AP2.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij (m)	Lj (m)	ΔP_j (kW)	S(t)i (kVA)	ΔV_j (V)	ΔV (%)
0	1	8,77	8,77	0,000	1,648	0,040	0,017
1	2	29,84	38,60	0,044	9,471	0,824	0,343
2	3	30,70	69,31	0,105	1,782	0,978	0,408
3	4	4,46	73,77	0,189	3,865	1,027	0,428
4	5	31,58	105,34	0,617	8,565	1,793	0,747
5	6	33,21	138,55	1,903	13,467	3,083	1,285
6	7	33,71	172,26	3,645	9,503	4,054	1,689
7	8	16,14	188,41	5,642	9,489	4,528	1,887
3	9	29,30	98,61	0,197	1,901	1,137	0,474
9	10	21,34	119,94	0,311	2,050	1,264	0,527
10	11	17,58	137,52	0,715	7,014	1,616	0,673
11	12	40,07	177,59	1,673	8,278	2,587	1,078
3	13	10,33	79,64	0,158	1,851	1,033	0,430
13	14	23,85	103,49	0,265	1,990	1,169	0,487
14	15	6,92	110,41	0,442	4,191	1,252	0,522
15	16	36,37	146,78	1,038	6,903	1,978	0,824
16	17	30,44	177,22	2,429	10,956	2,959	1,233
0	18	36,58	36,58	0,004	3,630	0,368	0,153
18	19	10,34	46,93	0,012	1,663	0,416	0,173
19	20	11,34	58,26	0,131	10,382	0,743	0,310
20	21	32,75	91,02	0,323	4,037	1,118	0,466
21	22	4,96	95,98	0,420	2,195	1,150	0,479
22	23	16,97	112,96	0,930	8,133	1,546	0,644
23	24	32,86	145,81	1,505	3,678	1,913	0,797
24	25	7,34	153,16	2,972	12,507	2,184	0,910
25	26	34,26	187,42	7,761	21,396	4,398	1,833
19	27	20,57	67,49	0,030	1,686	0,512	0,213
27	28	19,61	87,10	0,060	1,725	0,607	0,253
28	29	41,35	128,45	0,185	3,860	1,056	0,440
29	30	18,49	146,94	0,285	2,016	1,163	0,485
30	31	5,63	152,57	0,390	2,155	1,199	0,499
31	32	10,62	163,19	0,604	3,417	1,304	0,543
1	33	24,16	32,93	0,003	1,652	0,151	0,063
33	34	26,30	59,23	0,013	1,665	0,272	0,113
34	35	16,55	75,78	0,115	7,922	0,637	0,265
35	36	27,74	103,52	0,207	1,914	0,789	0,329
34	37	31,71	90,94	0,139	7,952	0,975	0,406
1	38	14,55	23,32	0,002	1,651	0,107	0,044
38	39	25,24	48,55	0,011	1,662	0,223	0,093
39	40	10,69	59,24	0,078	7,035	0,432	0,180
40	41	35,52	94,76	0,449	10,787	1,507	0,628
39	42	29,61	78,16	0,089	6,209	0,734	0,306

Tabla 16. Flujo de potencia total de red optimizada AP2.

Denominación	Cantidad	Unidad
S(t)	232,71	(kVA)
P(t)	212,76	(kW)
Q(t)	94,26	(kVAr)
Fp	0,91	---

4.2.4. Análisis Económico.

El análisis económico permite determinar la rentabilidad de realizar una modificación en la red, mediante el indicador (RBC).

Tabla 17. Análisis RBC para AP2.

Año	Red Existente			Red Proyectada			(1+ri) t	Beneficio (USD)	Costo (USD)	VAN
	S(t) (kVA)	ΔP (kW)	Ka ΔP (USD)	ΔP (kW)	Ka ΔP (USD)					
0	232,71	0,4867	824,99	0,373	711,69	1	113,31	200,42	-87,106	
1	242,37	0,5279	894,89	0,405	771,98	1,048	117,28	191,24	-73,956	
2	252,43	0,5726	970,71	0,439	837,39	1,098	121,39	182,48	-61,088	
3	262,90	0,6212	1052,95	0,477	908,33	1,151	125,64	174,12	-48,477	
4	273,81	0,6738	1142,16	0,517	985,29	1,206	130,05	166,14	-36,099	
5	285,17	0,7309	1238,92	0,561	1068,76	1,264	134,60	158,53	-23,933	
6	297,01	0,7928	1343,89	0,608	1159,31	1,325	139,32	151,27	-11,955	
7	309,34	0,8600	1457,74	0,660	1257,53	1,388	144,20	144,34	-0,145	
8	322,17	0,9328	1581,25	0,716	1364,07	1,455	149,25	137,73	11,519	
9	335,54	1,0118	1715,21	0,776	1479,64	1,525	154,48	131,43	23,058	
10	349,47	1,0976	1860,53	0,842	1605,00	1,598	159,90	125,41	34,490	
11	363,97	1,1906	2018,16	0,913	1740,97	1,675	165,50	119,66	45,837	
12	379,08	1,2914	2189,14	0,991	1888,47	1,755	171,30	114,18	57,117	
13	394,81	1,4008	2374,61	1,075	2048,47	1,839	177,30	108,95	68,349	
14	411,19	1,5195	2575,79	1,166	2222,02	1,928	183,51	103,96	79,551	
15	428,26	1,6483	2794,02	1,265	2410,27	2,020	189,94	99,20	90,743	

Los resultados del análisis económico el VAN es positivo desde el segundo trimestre del octavo año, así obtenido un RBC de 1,029.

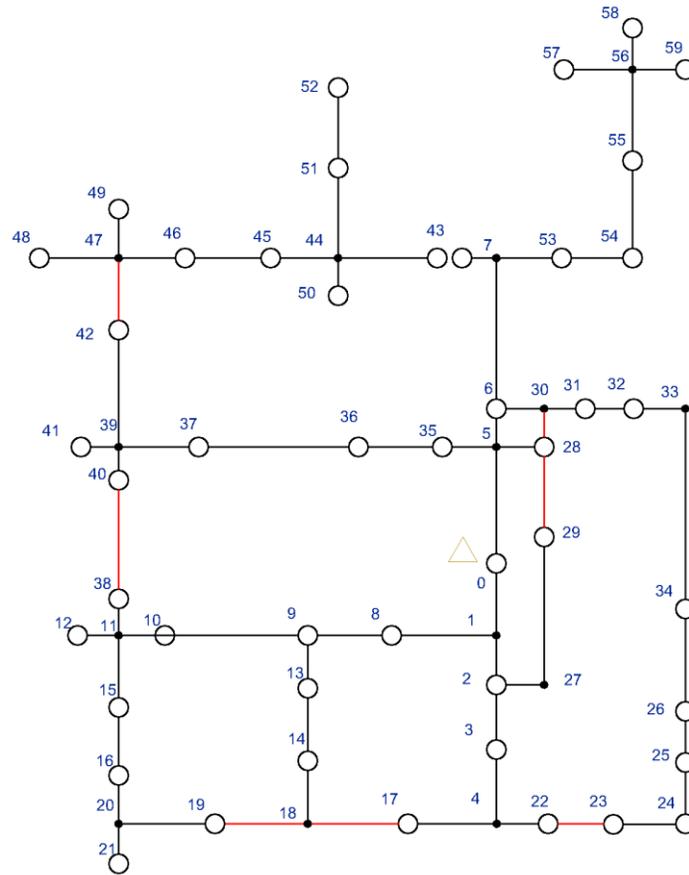


Figura 26. Despliegue de red en AP3.
Fuente: Autores.

Tabla 18. Datos de red y sus posibles caminos AP3.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij [m]	Usuarios	Configuración	Calibre (F-N)
0	1	21,020	1	3F4C	1/0-2
1	2	16,368	11	3F4C	1/0-2
2	3	32,068	10	3F4C	1/0-2
3	4	38,417	1	3F4C	1/0-2
0	5	21,830	1	3F4C	1/0-2
5	6	12,706	1	3F4C	1/0-2
6	7	36,425	1	3F4C	1/0-2
1	8	19,502	6	3F4C	1/0-2
8	9	24,993	3	3F4C	1/0-2
9	10	28,622	3	3F4C	1/0-2

10	11	7,931	1	3F4C	1/0-2
11	12	11,131	2	3F4C	1/0-2
9	13	23,840	4	3F4C	1/0-2
13	14	22,007	8	3F4C	1/0-2
11	15	21,508	7	3F4C	1/0-2
15	16	29,537	3	3F4C	1/0-2
4	17	22,234	9	3F4C	1/0-2
14	18	35,600	5	3F4C	1/0-2
20	19	12,886	1	3F4C	1/0-2
16	20	24,689	1	3F4C	1/0-2
20	21	6,161	1	3F4C	1/0-2
4	22	10,153	3	3F4C	1/0-2
24	23	22,642	2	3F4C	1/0-2
23	24	22,642	1	3F4C	1/0-2
24	25	28,756	1	3F4C	1/0-2
5	26	12,706	2	3F4C	1/0-2
2	27	8,134	1	3F4C	1/0-2
5	28	8,115	5	3F4C	1/0-2
27	29	42,399	1	3F4C	1/0-2
6	30	8,773	1	3F4C	1/0-2
30	31	17,231	1	3F4C	1/0-2
31	32	25,044	1	3F4C	1/0-2
32	33	14,490	1	3F4C	1/0-2
33	34	44,022	1	3F4C	1/0-2
34	35	44,375	3	3F4C	1/0-2
26	36	17,442	7	3F4C	1/0-2
36	37	31,089	5	3F4C	1/0-2
11	38	6,685	2	3F4C	1/0-2
37	39	20,843	1	3F4C	1/0-2
39	40	5,941	1	3F4C	1/0-2
39	41	8,959	1	3F4C	1/0-2
40	42	37,909	3	3F4C	1/0-2
7	43	6,042	1	3F4C	1/0-2
43	44	14,806	1	3F4C	1/0-2
44	45	24,821	6	3F4C	1/0-2
45	46	26,925	2	3F4C	1/0-2
46	47	9,541	1	3F4C	1/0-2
47	48	25,804	1	3F4C	1/0-2
47	49	14,053	7	3F4C	1/0-2
44	50	7,965	4	3F4C	1/0-2
44	51	22,454	4	3F4C	1/0-2
51	52	23,078	7	3F4C	1/0-2
7	53	16,687	4	3F4C	1/0-2
53	54	28,595	6	3F4C	1/0-2
54	55	35,939	9	3F4C	1/0-2
55	56	27,194	1	3F4C	1/0-2

56	57	8,065	2	3F4C	1/0-2
56	58	14,970	4	3F4C	1/0-2
56	59	15,088	1	3F4C	1/0-2
25	35	31,842	1	3F4C	1/0-2

4.2.3. Optimización de la red.

Aplicado el modelo GWO se expone resultados de optimización:

Tabla 19. Resultado de la optimización de la red AP3.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij (m)
0	1	21,02
1	2	16,37
2	3	32,07
3	4	38,42
0	5	21,83
5	6	12,71
6	7	36,42
1	8	19,50
8	9	24,99
9	10	28,62
10	11	7,93
11	12	11,13
9	13	23,84
13	14	22,01
11	15	21,51
15	16	29,54
4	17	22,23
14	18	35,60
18	19	22,99
16	20	24,69
20	21	6,16

4	22	10,15
22	23	33,21
23	24	22,64
24	25	28,76
5	26	12,71
2	27	8,13
5	28	8,12
28	29	17,04
28	30	12,93
30	31	17,23
31	32	25,04
32	33	14,49
33	34	44,02
34	35	44,38
26	36	17,44
36	37	31,09
11	38	6,69
37	39	20,84
39	40	5,94
39	41	8,96
39	42	32,02
7	43	6,04
43	44	14,81
44	45	24,82
45	46	26,93
46	47	9,54
47	48	25,80
47	49	14,05
44	50	7,96
44	51	22,45
51	52	23,08
7	53	16,69

53	54	28,60
54	55	35,94
55	56	27,19
56	57	8,07
56	58	14,97
56	59	15,09

Red optimizada.

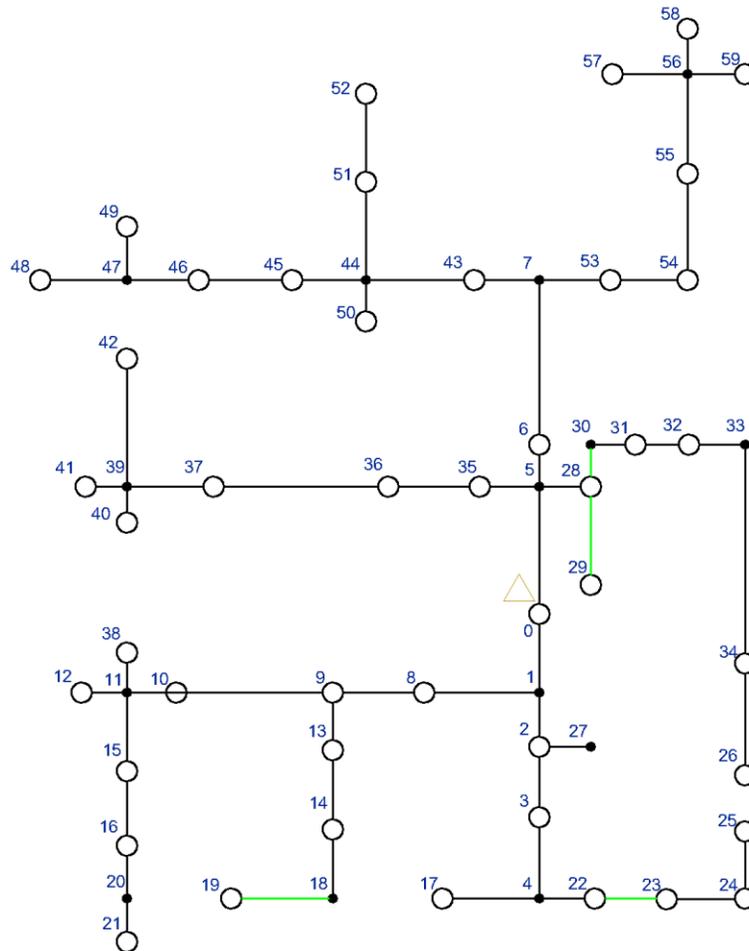


Figura 27. Red Optimizada AP3.
Fuente: Autores.

Se renumera la red optimizada y se identifica el ramal trocal (*principal*) de acuerdo a la mayor longitud que para el caso va desde 0 a 8, para su posterior análisis.

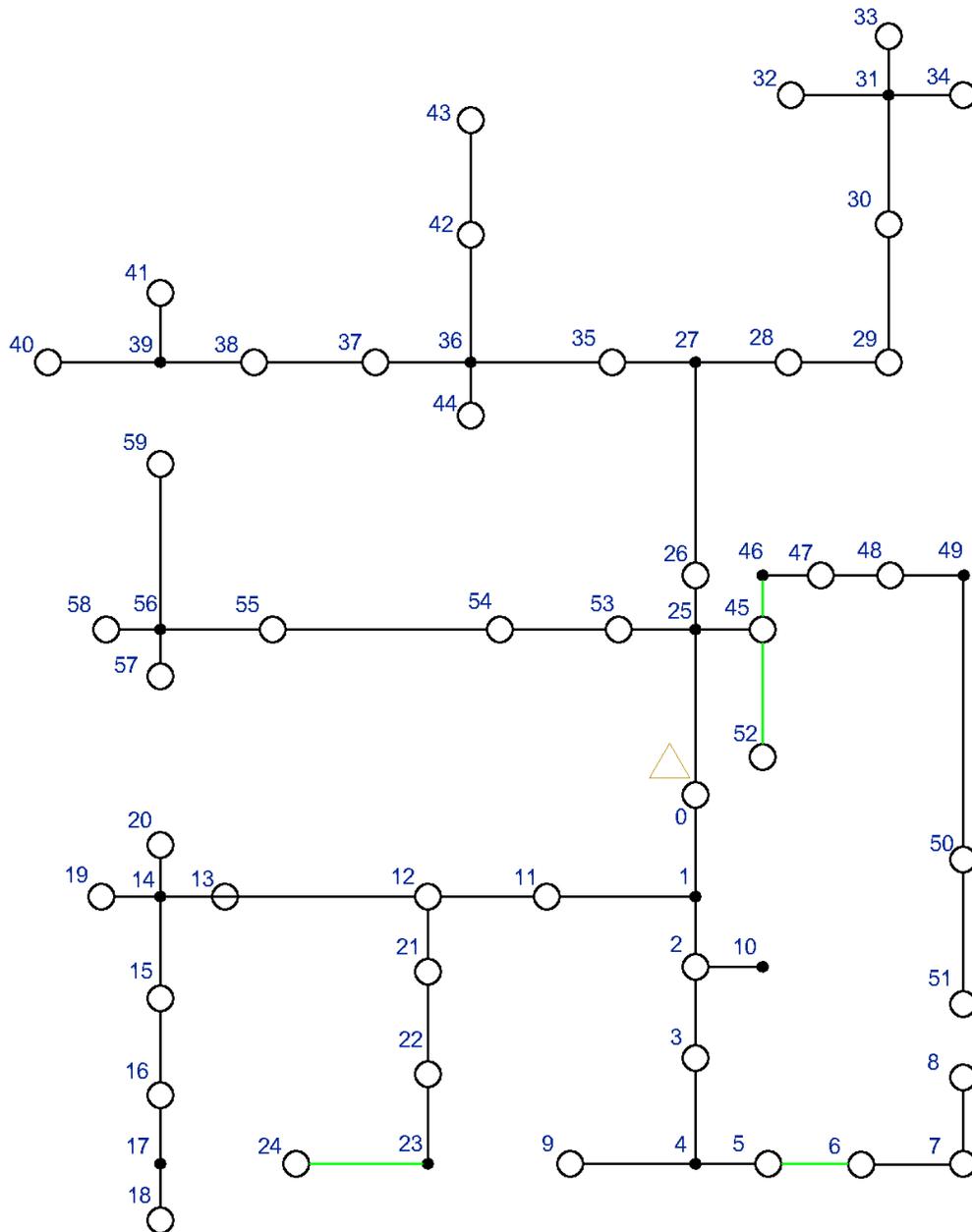


Figura 28. Asignación numérica a los nodos de la red optimizada AP3.

Fuente: Autores.

Las restricciones en verificación de las condiciones de LCK en los ramales que tengan bifurcaciones.

Tabla 20. Resultado de corrientes en ramales.

ni	nj	ΔV_{nij}	ΔV_{nj}	ΔV_{nij}	ΔV_j	Inij	Inj
		V	V	%	%	A	A
0	1	0,096	0,096	0,040	0,040	---	49,07
1	2	0,463	0,559	0,193	0,233	30,73	33,33
2	3	0,836	1,395	0,348	0,581	28,37	---
3	4	0,175	1,571	0,073	0,655	---	36,81
4	5	0,102	1,673	0,042	0,697	10,91	---
5	6	0,242	1,915	0,101	0,798	---	---
6	7	0,103	2,018	0,043	0,841	---	---
7	8	0,131	2,149	0,055	0,896	---	---
4	9	0,530	2,101	0,221	0,875	25,90	---
2	10	0,037	0,596	0,015	0,248	4,97	---
1	11	0,329	0,425	0,137	0,177	18,34	---
11	12	0,251	0,676	0,105	0,282	---	24,78
12	13	0,287	0,963	0,120	0,401	10,91	---
13	14	0,036	1,000	0,015	0,417	---	36,69
14	15	0,413	1,413	0,172	0,589	20,86	---
15	16	0,296	1,709	0,124	0,712	---	---
16	17	0,113	1,822	0,047	0,759	---	---
17	18	0,028	1,850	0,012	0,771	---	---
14	19	0,081	1,081	0,034	0,450	7,92	---
14	20	0,049	1,048	0,020	0,437	7,92	---
12	21	0,304	0,980	0,127	0,408	13,87	---
21	22	0,474	1,454	0,197	0,606	---	---
22	23	0,548	2,003	0,228	0,834	---	---
23	24	0,105	2,108	0,044	0,878	---	---
0	25	0,100	0,100	0,042	0,042	---	32,59
25	26	0,058	0,158	0,024	0,066	4,96	---
26	27	0,166	0,324	0,069	0,135	---	18,83
27	28	0,213	0,537	0,089	0,224	13,87	---
28	29	0,483	1,020	0,201	0,425	---	---
29	30	0,857	1,877	0,357	0,782	---	---
30	31	0,124	2,001	0,052	0,834	---	26,74

31	32	0,059	2,060	0,024	0,858	7,92	---
31	33	0,191	2,192	0,080	0,913	13,86	---
31	34	0,069	2,070	0,029	0,862	4,96	---
27	35	0,028	0,351	0,011	0,146	4,96	---
35	36	0,068	0,419	0,028	0,175	---	46,06
36	37	0,419	0,838	0,175	0,349	18,34	---
37	38	0,196	1,034	0,082	0,431	---	---
38	39	0,044	1,078	0,018	0,449	---	25,82
39	40	0,118	1,196	0,049	0,498	4,96	---
39	41	0,270	1,348	0,112	0,562	20,86	---
36	42	0,287	0,706	0,119	0,294	13,86	---
42	43	0,443	1,149	0,185	0,479	---	---
36	44	0,102	0,521	0,042	0,217	13,86	---
25	45	0,125	0,225	0,052	0,094	16,73	9,92
45	46	0,059	0,284	0,025	0,118	4,96	---
46	47	0,079	0,362	0,033	0,151	---	---
47	48	0,114	0,477	0,048	0,199	---	---
48	49	0,066	0,543	0,028	0,226	---	---
49	50	0,201	0,744	0,084	0,310	---	---
50	51	0,324	1,067	0,135	0,445	---	---
45	52	0,078	0,302	0,032	0,126	4,96	---
25	53	0,128	0,227	0,053	0,095	10,90	---
53	54	0,335	0,562	0,140	0,234	---	---
54	55	0,479	1,041	0,199	0,434	---	---
55	56	0,095	1,136	0,040	0,473	---	20,82
56	57	0,027	1,163	0,011	0,485	4,96	---
56	58	0,041	1,177	0,017	0,490	4,96	---
56	59	0,321	1,458	0,134	0,607	10,90	---

Tabla 21. Flujo de potencia de red Optimizada AP3.

Nodo "i"	Nodo "j"	Lij (m)	Lj (m)	ΔP_j (kW)	S(t)i (kVA)	ΔV_j (V)	ΔV (%)
0	1	21,02	21,02	0,001	1,649	0,096	0,040
1	2	16,37	37,39	0,049	10,277	0,563	0,234
2	3	32,07	69,46	0,299	9,796	1,441	0,601
3	4	38,42	107,87	0,572	2,399	1,713	0,714
4	5	10,15	118,03	0,899	4,794	1,855	0,773
5	6	33,21	151,23	1,552	4,699	2,324	0,968

6	7	22,64	173,87	2,317	4,810	2,658	1,108
7	8	28,76	202,63	3,709	6,763	3,258	1,358
4	9	22,23	130,11	1,417	10,437	2,382	0,992
2	10	8,13	45,52	0,078	1,747	0,603	0,251
1	11	19,50	40,52	0,022	6,124	0,427	0,178
11	12	24,99	65,52	0,079	3,724	0,687	0,286
12	13	28,62	94,14	0,203	3,883	1,000	0,417
13	14	7,93	102,07	0,282	2,012	1,046	0,436
14	15	21,51	123,58	0,719	7,858	1,527	0,636
15	16	29,54	153,11	1,305	5,338	1,993	0,830
16	17	24,69	177,80	1,962	4,313	2,319	0,966
17	18	6,16	183,96	2,680	5,317	2,419	1,008
14	19	11,13	113,20	0,438	3,198	1,148	0,478
14	20	6,69	108,75	0,420	3,174	1,107	0,461
12	21	23,84	89,36	0,219	4,887	1,014	0,423
21	22	22,01	111,36	0,634	8,587	1,549	0,646
22	23	35,60	146,96	1,403	7,387	2,317	0,966
23	24	22,99	169,95	2,090	4,492	2,634	1,097
0	25	21,83	21,83	0,001	1,649	0,100	0,042
25	26	12,71	34,54	0,003	1,652	0,158	0,066
26	27	36,42	70,96	0,016	1,668	0,327	0,136
27	28	16,69	87,65	0,075	4,703	0,545	0,227
28	29	28,60	116,24	0,276	6,447	1,063	0,443
29	30	35,94	152,18	0,934	9,806	2,067	0,861
30	31	27,19	179,38	1,416	3,554	2,361	0,984
31	32	8,07	187,44	2,064	5,403	2,493	1,039
31	33	14,97	194,34	2,457	7,871	2,714	1,131
31	34	15,09	194,46	2,014	4,386	2,563	1,068
27	35	6,04	77,00	0,031	1,687	0,355	0,148
35	36	14,81	91,81	0,059	1,723	0,427	0,178
36	37	24,82	116,63	0,232	6,391	0,871	0,363
37	38	26,93	143,55	0,422	3,177	1,117	0,466
38	39	9,54	153,10	0,578	2,407	1,185	0,494
39	40	25,80	178,90	0,873	2,807	1,402	0,584
39	41	14,05	167,15	1,276	8,587	1,534	0,639
36	42	22,45	114,26	0,182	4,840	0,731	0,305
42	43	23,08	137,34	0,545	7,633	1,230	0,512
36	44	7,96	99,77	0,159	4,809	0,534	0,222
25	45	8,12	29,94	0,014	5,578	0,225	0,094
45	46	12,93	42,87	0,031	1,687	0,286	0,119
46	47	17,23	60,10	0,062	1,727	0,369	0,154
47	48	25,04	85,15	0,120	1,802	0,497	0,207
48	49	14,49	99,64	0,187	1,888	0,575	0,240
49	50	44,02	143,66	0,354	2,108	0,844	0,352
50	51	44,38	188,04	0,683	3,522	1,301	0,542
45	52	17,04	46,99	0,034	1,691	0,306	0,127

25	53	12,71	34,54	0,009	3,635	0,228	0,095
53	54	17,44	51,98	0,072	7,027	0,568	0,237
54	55	31,09	83,07	0,251	5,879	1,081	0,451
55	56	20,84	103,91	0,393	2,159	1,213	0,505
56	57	5,94	109,85	0,515	2,322	1,253	0,522
56	58	8,96	112,87	0,530	2,342	1,274	0,531
56	59	32,02	135,93	0,773	4,627	1,643	0,685

Tabla 22. Flujo de potencia total de red optimizada.

Denominación	Cantidad	Unidad
S(t)	265,49	(kVA)
P(t)	242,78	(kW)
Q(t)	107,43	(kVAr)
Fp	0,91	---

4.2.4. Análisis Económico.

El análisis económico permite determinar la rentabilidad de realizar una modificación en la red, mediante el indicador (RBC).

Tabla 23. Análisis RBC para AP3.

Año	Red Existente			Red Proyectada			(1+ri) t	Beneficio (USD)	Costo (USD)	VAN
	S(t) (kVA)	ΔP (kW)	Ka ΔP (USD)	ΔP (kW)	Ka ΔP (USD)					
0	265,49	0,8126	1377,39	0,626	1192,46	1	184,92	258,00	-73,081	
1	276,50	0,8814	1494,08	0,679	1293,49	1,048	191,40	246,19	-54,784	
2	287,98	0,9561	1620,66	0,736	1403,08	1,098	198,11	234,91	-36,801	
3	299,93	1,0371	1757,97	0,798	1521,95	1,151	205,05	224,15	-19,100	
4	312,38	1,1249	1906,91	0,866	1650,89	1,206	212,24	213,89	-1,648	
5	325,34	1,2202	2068,47	0,940	1790,76	1,264	219,67	204,09	15,585	
6	338,84	1,3236	2243,71	1,019	1942,48	1,325	227,37	194,74	32,630	
7	352,91	1,4358	2433,80	1,105	2107,05	1,388	235,34	185,82	49,517	
8	367,55	1,5574	2640,00	1,199	2285,56	1,455	243,59	177,31	66,274	
9	382,80	1,6893	2863,67	1,301	2479,20	1,525	252,12	169,19	82,930	
10	398,69	1,8325	3106,29	1,411	2689,24	1,598	260,96	161,44	99,514	
11	415,24	1,9877	3369,46	1,530	2917,08	1,675	270,10	154,05	116,052	
12	432,47	2,1561	3654,93	1,660	3164,22	1,755	279,56	146,99	132,572	
13	450,42	2,3388	3964,58	1,801	3432,30	1,839	289,36	140,26	149,101	
14	469,11	2,5369	4300,47	1,953	3723,10	1,928	299,50	133,84	165,664	
15	488,58	2,7519	4664,81	2,119	4038,53	2,020	309,99	127,71	182,289	

Los resultados del análisis económico indican que el VAN es positivo desde el segundo trimestre del quinto año, así obtenido un RBC de *1,305*.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El análisis de resultados obtenidos al aplicar el modelo GWO de optimización a un sistema de distribución en bajo voltaje, con cambios de: topología y aspectos económicos.

5.1. Análisis API

Al aplicar la metodología se puede apreciar que existe cambio en la red, tanto en su forma topológica como caídas de voltaje que existen en los nodos.

Con respecto a su topología, existen cambios de conexión en los vanos para los nodos 14 y 21, ya que sin aplicar la metodología parte desde los nodos 2 y 7, mientras tanto luego de realizar la optimización estas parten desde los nodos 11 y 18 respectivamente.

El cambio de topología implica también variaciones en caída de voltaje en los nodos analizados, debido a la nueva forma de la red de distribución.

Tabla 24. Comparación de resultados API.

		<i>Red Existente</i>		<i>Red Proyectado</i>	
Nodo "i"	Nodo "j"	ΔV (%)	Nodo "i"	Nodo "j"	ΔV (%)
6	8	2,298	18	21	1,183
6	9	2,479	7	8	2,479
10	11	1,679	19	20	1,679
13	15	1,413	11	14	0,643

Con respecto al análisis económico que se realiza para 15 años, obteniendo un RBC de 1,291 lo que demuestra que los resultados de la optimización son rentables.

5.2. Análisis AP2.

Mediante la metodología se observa y se determina la topología, caída de voltaje. Siendo así que, según la topología hay cambios en los nodos 8, 16, 26, 35, 36, 37, 41 de energización.

Con los datos obtenidos al aplicar la metodología se realizar una comparación de resultados, para el cual se ha tomado los nodos que tienen una mayor caída de tensión al aplicar GWO y luego comparar con [19],[27]:

Tabla 25. Comparación de resultados AP2.

<i>GWO</i>		<i>RNA</i>		<i>Dijkstra</i>	
<i>Nodo</i>	ΔV (%)	<i>Nodo</i>	ΔV (%)	<i>Nodo</i>	ΔV (%)
6	1,285	5	3,867	4	5,333
7	1,689	6	5,618	5	5,507
17	1,233	14	2,928	13	3,792
26	1,833	31	2,836	30	7,699

Según la *Tabla25* se determina que el método GWO presenta menor caída de voltaje con respecto a otras metodologías. Mediante esta metodología el nodo en mención está dentro de los límites establecidos de 6% en zonas urbanas.

Este resultado es debido a la topología que la red adquiere al ser optimizada. Cabe mencionar que la numeración de los nodos es distinta pero su ubicación es la misma.

Con respecto al análisis económico se tiene un RBC de 1,029, siendo rentable realizar cambios en la topología.

5.3. Análisis AP3.

Mediante la metodología se observa y se determina variaciones de la topología como caída de voltaje, de esta manera se tienen cambios de entrega de energía en los nodos 6,8,24,47,52,51.

Con los datos obtenidos al aplicar la metodología se realiza una comparación de resultados, para el cual se ha tomado los nodos que tienen una mayor caída de voltaje al aplicar GWO y luego comparar con [19],[27]:

Tabla 26. Comparación de resultados AP3.

GWO		RNA		Dijkstra		ACO	
<i>Nodo</i>	<i>ΔV (%)</i>	<i>Nodo</i>	<i>ΔV (%)</i>	<i>Nodo</i>	<i>ΔV (%)</i>	<i>Nodo</i>	<i>ΔV (%)</i>
24	1,097	50	4,235	49	5,853	50	4,490
7	1,108	20	3,102	19	5,128	20	3,102
8	1,358	18	2,357	18	5,014	18	2,357
33	1,131	26	3,922	25	8,479	26	3,922

Según la *tabla 26* se determina que el método GWO presenta menor caída de voltaje, de esta manera todos los nodos no exceden los límites de caída de voltaje para zonas urbanas.

El resultado depende de la topología que la red adquiere al ser optimizada. Cabe mencionar que la numeración de los nodos es distinta pero su ubicación es la misma.

Con respecto al análisis económico, el método GWO tiene un RBC de 1,305 por lo que es rentable aplicarlo.

Los resultados obtenidos con este método pueden variar en otros tipos de topología al realizar comparaciones con los métodos analizados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la aplicación de la metodología GWO se puede obtener una nueva topología de la red eléctrica en un sistema de distribución en bajo voltaje, permitiendo reducir pérdidas y brindando un nivel de voltaje adecuado para su uso.

En este modelo de optimización los datos de ingreso son puntos con coordenadas (x, y) , los cuales son tomados de los postes de la red geoposicionada; el análisis que se realiza es por cada nodo, con el objetivo de encontrar todos los caminos posibles.

Al analizar mediante la metodología GWO se puede determinar un camino corto, ya que cada agente se encamina por los ramales existentes, siendo este el camino por el cual se debe seguir hasta el siguiente nodo y a su vez al punto final del sistema. Una vez encontrada la solución óptima de la red de distribución se tiene una topología con nuevos despliegues.

Con los caminos encontrados al aplicar el modelo de optimización propuesto, se realiza la remuneración de la nueva red y se analiza las restricciones de LCK, para en lo posterior realizar el estudio de flujo de potencia que permiten comprobar los resultados de caída de voltaje y pérdida de potencia, en donde se comprueba que los resultados están dentro de las condiciones exigidas para zona urbana.

Una vez realizada los flujos de potencia se realiza un análisis de costos conocido como (RCB). En donde se tiene resultados mayores a la unidad para las zonas analizadas, lo que demuestra que es viable (*rentable*) realizar los nuevos despliegues de red.

El planteamiento de los despliegues de red en la zona urbana resulta limitado por las cuadras que tiene la zona, lo cual impide la posibilidad de trazar una variedad de rutas.

El parámetro a permite mejorar la exploración y explotación de los agentes de búsqueda, para este trabajo se utiliza el método lineal. Se recomienda para las próximas investigaciones realizar pruebas con el método exponencial, criterio de la no linealidad, entre otras.

La cantidad de lobos por cada manada es de 5 a 12 el cual resulta óptimo al momento de la cacería. Para cada nodo del grafo se crean nuevas poblaciones de lobos. Estos nodos del mallado del sistema de distribución se encuentran formados por enlaces (lobos), por lo tanto, la cantidad de enlaces se encuentra dentro del rango óptimo por manada.

Una red de distribución tiene una topología radial, por lo que es necesario hacer un mallado para poder aplicar el modelo GWO. Como segundo paso es importante renumerar los nodos (*poste*), y tener presente la dirección de flujo de corriente para realizar el grafo de la red final.

Esta metodología se podría implementar en los SD de medio Voltaje, pero debido a la gran cantidad de nodos, la ejecución del algoritmo se realizará en grandes periodos de tiempo, esto implica el requerimiento de un CPU con características de última generación o similares.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] H. Xing *et al.*, “An integer encoding grey wolf optimizer for virtual network function placement,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 76, pp. 575–594, 2019.
- [2] G. Schweickardt and V. Miranda, “Metaheurística FEPSO aplicada a problemas de Optimización Combinatoria: Balance de Fases en Sistemas de Distribución Eléctrica,” *Ciencia, docencia y Tecnol.*, no. 40, pp. 133–163, 2010.
- [3] M. Kohli and S. Arora, “Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 458–472, 2018.
- [4] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [5] C. Lu, L. Gao, and J. Yi, “Grey wolf optimizer with cellular topological structure,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 107, pp. 89–114, 2018.
- [6] G. Franco-Sepúlveda, J. C. Del Rio-Cuervo, and M. A. Pachón-Hernández, “State of the art about metaheuristics and artificial neural networks applied to open pit mining,” *Resour. Policy*, vol. 60, no. October 2017, pp. 125–133, 2019.
- [7] A. A. Heidari, R. Ali Abbaspour, and H. Chen, “Efficient boosted grey wolf optimizers for global search and kernel extreme learning machine training,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 81, p. 105521, 2019.
- [8] S. S. G. and M. K., “Diagnosis of diabetes diseases using optimized fuzzy rule set by grey wolf optimization,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 125, pp. 432–438, 2019.
- [9] M. A. Al-Betar, M. A. Awadallah, H. Faris, I. Aljarah, and A. I. Hammouri, “Natural selection methods for Grey Wolf Optimizer,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 113, pp. 481–498, 2018.
- [10] H. Faris, I. Aljarah, M. A. Al-Betar, and S. Mirjalili, “Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 30, no. 2, pp. 413–435, 2018.
- [11] M. Pradhan, P. K. Roy, and T. Pal, “Oppositional based grey wolf optimization

- algorithm for economic dispatch problem of power system,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 2015–2025, 2018.
- [12] S. Ramirez Castaño, *Redes de Distribución de Energía*. 2014.
- [13] R. A. Gómez Vizhñay and R. H. Juca Sáenz, “Proceso para el modelamiento y simulación de flujos de carga de las redes de media y baja tensión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.,” 2017.
- [14] R. A. Montes de Oca Paredes, *Introducción a Sistemas Eléctricos de Potencia*. Juliaca, 2014.
- [15] J. G. Cárdenas Cobos and B. D. Jaramillo León, “Modelación y Simulación de las Redes de Baja Tensión de la Empresa Eléctrica Regional Centro sur C.A.,” 2017.
- [16] MEER, “Homologación de las Unidades de Propiedad (UP) y Unidades Construcción (UC) del Sistema de Distribución Eléctrica.” 2013.
- [17] J. E. Romero Alvarracín, “Reconfiguración de la topología de un alimentador para la minimización de costos por pérdidas empleando el algoritmo colonia de hormigas,” p. 80, 2018.
- [18] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Fourth Edi. 2018.
- [19] D. H. Arévalo Camacho and J. A. Guzmán Sicha, *Interconexión de redes eléctricas en bajo voltaje aplicado a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.* 2019.
- [20] C. Huerta Socorro, *Métodos de Flujo de Carga*. 2016.
- [21] A. de J. Leiva Chérrez, “Análisis técnico económico del factor de capacidad de los transformadores de la red de distribución primaria de la ciudad de ‘El Coca,’” 2014.
- [22] I. Cueva and L. Zhunio, “Óptima ubicación de estaciones de transformación y topología en sistemas de distribución en baja tensión para la Empresa Eléctrica Regional Centrosur,” pp. 1–110, 2017.
- [23] T. S. Guamán Espinoza and J. C. Velecela Chichay, “Análisis Técnico De La Interconexión Entre El Alimentador 124 De La S/E Azogues 1 Y El Alimentador

221 De La S/E Azogues 2 Pertenecientes a La Empresa Eléctrica Azogues C.a.,” p. 200, 2018.

- [24] M. J. Chimbo Campuzano and H. A. Molina Vélez, “Ubicación óptima de reguladores de voltaje en el sistema de medio voltaje correspondiente a la subestación Portovelo, aplicando segregación de flujo de carga al más crítico.,” p. 58, 2018.
- [25] J. A. Torres Barros and J. O. Paredes Cuchiparte, “Análisis de rentabilidad económica de los nuevos alojamientos turísticos regulados por el ministerio de turismo en el año 2015 para determinar el punto de equilibrio en Puerto Ayora – Galápagos,” 2017.
- [26] F. Arevalo and A. Moscoso, “Optimización de transformadores en función de su perfil y crecimiento de la demanda,” pp. 1–74, 2016.
- [27] C. S. Geovanny Xavier and D. L. Paul Alexander, “Aplicación de una red neuronal a un sistema eléctrico de distribución mediante el análisis de comportamiento de su carga en bajo voltaje,” 2019.

ANEXOS.

A.1 Conductores ACSR de Electro Cables.

<i>Conductor</i>	<i>Calibre [AWG o Kcmil]</i>	<i>Sección Transversal [mm²]</i>	<i>Diámetro hilos [mm]</i>	<i>Diámetro del conductor [mm]</i>	<i>Resistencia A C.C. a 20° C [ohm/km]</i>	<i>Capacidad de Corriente [A]*</i>
Turkey	6	13,3	1,68	5,04	2,1065	105
Swan	4	21,15	2,118	6,35	1,3232	140
Sparrow	2	33,62	2,672	8,02	0,8316	184
Raven	1/0	53,49	3,37	10,11	0,5227	242
Quail	2/0	67,44	3,782	11,35	0,4151	276
Pigeon	3/0	85,02	4,247	12,74	0,3292	315
Penguin	4/0	107,2	4,77	14,31	0,261	357
Waxwing	266,8	135,19	3,092	15,46	0,2112	449
Partridge	266,8	135,19	2,573	16,3	0,2091	475
Ostrich	300	152	2,73	17,28	0,186	492
Piper	300	152	2,54	17,78	0,1902	490
Merlin	336,4	170,45	3,472	17,36	0,1674	519
Linnet	336,4	170,45	2,888	18,29	0,166	529
Oriole	336,4	170,45	2,69	18,83	0,1647	535
Chickadee	397,5	201,41	3,774	18,87	0,1416	576
Brant	397,5	201,41	3,27	19,61	0,1411	584
Ibis	397,5	201,41	3,14	19,88	0,1405	587
Lark	397,5	201,41	2,923	20,46	0,1394	594
Pelican	477	241,7	4,135	20,68	0,118	646
Flicker	477	241,7	3,581	21,48	0,1174	655
Hawk	477	241,7	3,439	21,8	0,117	659
Hen	477	241,7	3,203	22,42	0,1162	666
Heron	500	253,35	3,279	22,95	0,1141	694
Osprey	556,5	281,98	4,466	22,32	0,1012	711
Parakeet	556,5	281,98	3,87	23,22	0,1007	721
Dove	556,5	281,98	3,72	23,55	0,1002	726

A.2. Estratos según la Demanda y número de clientes (Página web Centro Sur).

<i>Estrato</i>	*A1* <i>501-1000kWh</i>	*A* <i>311-500kWh</i>	*B* <i>181-310kWh</i>	*C* <i>111-180kWh</i>	*D* <i>61-110kWh</i>	*E* <i>I-60kWh</i>
Nro. Clientes	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)
1	6,16	5,7	4,22	3,13	2,53	2,06
2	9,85	9,12	6,75	5,01	4,05	3,29
3	13,54	12,53	9,28	6,89	5,56	4,53
4	17,24	15,96	11,81	8,77	7,08	5,76
5	20,78	19,23	14,24	10,57	8,54	6,95
6	23,65	21,6	15,91	11,75	9,43	7,62
7	26,49	24,34	17,97	13,3	10,7	8,67
8	29,56	27,2	20,09	14,88	11,98	9,72
9	32,4	29,92	22,12	16,41	13,23	10,76
10	35,25	32,62	24,14	17,92	14,47	11,77
11	38,1	35,29	26,13	19,42	15,68	12,77
12	40,94	37,98	28,13	20,91	16,89	13,76
13	44,01	40,82	30,23	22,48	18,16	14,8
14	46,85	43,5	32,23	23,97	19,37	15,79
15	49,7	46,17	34,21	25,45	20,58	16,78
16	52,55	48,82	36,18	26,92	21,77	17,75
17	55,39	51,47	38,14	28,38	22,94	18,71
18	58,24	54,13	40,12	29,86	24,14	19,69
19	60,87	56,6	41,96	31,23	25,26	20,61
20	63,93	59,4	44,02	32,75	26,48	21,6
21	66,56	61,89	45,88	34,15	27,62	22,53
22	69,41	64,52	47,83	35,59	28,79	23,48
23	71,81	66,84	49,57	36,91	29,87	24,38
24	72,25	67,78	50,4	37,66	30,58	25,06
25	74,44	69,98	52,07	38,95	31,65	25,96
26	78,82	73,65	54,69	40,8	33,07	27,04
27	81,45	76,15	56,56	42,2	34,21	27,99
28	85,17	79,35	58,86	43,85	35,5	28,98
29	86,48	80,92	60,11	44,87	36,39	29,78
30	89,11	83,34	61,9	46,2	37,46	30,65
31	91,74	85,82	63,75	47,58	38,58	31,57
32	94,37	88,29	65,59	48,96	39,7	32,49
33	96,99	90,76	67,42	50,33	40,82	33,4

<i>Estrato</i>	<i>*AI*</i> <i>501-1000kWh</i>	<i>*A*</i> <i>311-500kWh</i>	<i>*B*</i> <i>181-310kWh</i>	<i>*C*</i> <i>111-180kWh</i>	<i>*D*</i> <i>61-110kWh</i>	<i>*E*</i> <i>1-60kWh</i>
Nro. Clientes	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)
34	99,4	93	69,09	51,57	41,82	34,22
35	102,03	95,46	70,91	52,93	42,92	35,13
36	104,44	97,76	72,64	54,23	43,99	36
37	107,07	100,21	74,45	55,58	45,08	36,9
38	109,47	102,5	76,17	56,87	46,14	37,77
39	112,1	104,95	77,98	58,22	47,23	38,66
40	114,51	107,23	79,68	59,5	48,27	39,52
41	116,92	109,51	81,39	60,78	49,31	40,37
42	119,33	111,79	83,08	62,05	50,35	41,23
43	121,52	113,91	84,68	63,26	51,34	42,05
44	124,14	116,33	86,47	64,59	52,41	42,92
45	126,77	118,75	88,25	65,91	53,48	43,78
46	129,18	121,1	90,03	67,26	54,59	44,71
47	131,81	123,52	91,81	68,58	55,65	45,57
48	134,43	125,92	93,58	69,89	56,7	46,43
49	136,62	128,02	95,15	71,07	57,67	47,23
50	139,03	130,27	96,82	72,32	58,68	48,05