

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOCALIZADORES DE FALLA EN REDES
ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN O SUBTRANSMISIÓN.**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOCALIZADORES DE FALLA EN REDES
ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN EMPLEANDO EL MÉTODO DE
COLONIA DE HORMIGAS.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA**

ZOILA SOFÍA SANTANA INTRIAGO

zoila.santana@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

fabian.perez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ZOILA SOFÍA SANTANA INTRIAGO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ZOILA SOFÍA SANTANA INTRIAGO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ZOILA SOFÍA SANTANA INTRIAGO, bajo mi supervisión.

DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ZOILA SOFÍA SANTANA INTRIAGO

FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi corazón a mi familia, amigos y seres queridos. Esto no sería posible sin el inmenso amor y apoyo de mi amada familia. A mis padres, Mariano Santana y Zoyla Intriago, les agradezco profundamente por ser los faros que han iluminado mi camino con amor y sacrificio, guiándome hacia la realización de este sueño. Son el cable a tierra que me ha mantenido firme cuando más lo necesitaba.

A mis hermanos, Lisbeth y Gregorio, gracias por su aliento constante y por compartir conmigo las alegrías y desafíos de este viaje inolvidable. A Kevin Santana, quien ha sido un apoyo incondicional durante toda mi vida en las buenas y en las malas, un hermano que la vida me regaló, mi pilar emocional, y a quien le debo muchas largas noches de frustración y enojo.

A mis tíos Gaby y Roddy, quienes durante mi formación académica y personal siempre han estado presentes brindándome todo su apoyo incondicional, caminando conmigo paso a paso, y a quienes considero como mi segunda familia.

A mi tía Pricela, quien me abrió las puertas de su hogar y ha sido más que una tía una madre para mí, sin duda un ejemplo a seguir. Su inquebrantable apoyo y motivación constante han sido la fuerza que me impulsó a superar todos los desafíos a lo largo de estos años. Sin su guía, este camino habría sido mucho más difícil de transitar.

A mis queridos amigos, agradezco sus risas que aligeraron los momentos más oscuros, su consuelo que calmó las tormentas y su comprensión que iluminó los días más intensos. Gracias por celebrar conmigo cada triunfo y por ser mi refugio en las derrotas.

A los profesores y mentores que han compartido su paciencia y sabiduría, les dedico mi profundo agradecimiento. Sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi formación, guiándome hacia el conocimiento y la inspiración que hoy celebro.

Ustedes han sido mi ancla en los días tormentosos y mis alas en los días de triunfo. Su amor y apoyo son los cimientos sólidos sobre los cuales construyo este logro, y les dedico con gratitud y cariño este capítulo significativo de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de titulación. Sus esfuerzos y apoyo han sido fundamentales en este viaje académico.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, mi pilar fundamental, les extiendo mi profundo agradecimiento. Su apoyo incondicional, comprensión y amor han sido mi motivación constante. Este logro es también suyo, y estoy agradecido/a por tenerlos a mi lado en cada paso de este camino.

A mis amigos, quienes han compartido risas, desafíos y momentos inolvidables, les agradezco por su amistad leal. Su aliento y compañía han sido mi refugio en los momentos difíciles.

A mi tutor, el Dr. Fabian Pérez, por su guía experta, paciencia y dedicación a lo largo de este proyecto. Sus valiosas sugerencias y conocimientos han sido clave para dar forma y mejorar este trabajo, y estoy agradecido/a por su mentoría constante.

Finalmente, a todas las personas que, de alguna manera, han contribuido a este proyecto, ya sea brindando información, apoyo técnico o palabras de aliento, les doy las gracias sinceramente. Este trabajo no habría sido posible sin la contribución de cada uno de ustedes.

¡A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de mi viaje en busca de mi crecimiento personal y profesional!

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivo Especifico.....	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco Teórico	4
2 METODOLOGÍA.....	14
2.1 Estructura general de la metodología.....	14
2.2 Modelación del SED.....	16
2.3 Algoritmo Genético.....	18
2.4 Algoritmo de Colonia de Hormigas.....	20
2.5 Función Algoritmo	24
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
3.1 Red de 17 nodos del IEEE	28
3.2 Alimentador de 120 nodos de la Empresa Eléctrica de Ambato	33
3.3 Conclusiones	39
3.4 Recomendaciones	40
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	41
5 ANEXOS	
Anexo I. Rutina Computacional	
Anexo II. Manual de Usuario	

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular se centra en el desarrollo de una herramienta computacional, utilizando el lenguaje de programación Python, que tiene como propósito central la ubicación óptima de localizadores de falla en redes eléctricas de distribución, basándose el método metaheurístico de Colonia de Hormigas.

En este enfoque, los localizadores de falla son considerados como "hormigas virtuales" que utilizan la inteligencia colectiva para buscar la posición óptima en la red eléctrica minimizando los tiempos de reparación y maximizando la precisión en la detección de fallas.

La aplicación de la herramienta computacional se llevó a cabo en una red de prueba de 17 nodos extraída del sistema de pruebas del IEEE de 33 nodos y en un alimentador real de 120 nodos perteneciente a la Empresa Eléctrica Ambato, en el marco de simulación del software CYMDIST.

PALABRAS CLAVE: algoritmo, CYMDIST, cortocircuito, distribución, fallas, herramienta, hormigas, optimización, Python.

ABSTRACT

The present curricular integration work focuses on the development of a computational tool, using the Python programming language, which has as its central purpose the optimal location of fault locators in electrical distribution networks, based on the Ant Colony metaheuristic method.

In this approach, fault locators are considered as "virtual ants" that use collective intelligence to search for the optimal position in the power grid, minimizing repair times and maximizing accuracy in fault detection.

The use of the computational tool will be carried out on a 17-node test net extracted from the 33-node IEEE test system and on a real 120-node feeder belonging to "Empresa Eléctrica Ambato", within the framework of simulation of the CYMDIST software.

KEYWORDS: algorithm, ants, CYMDIST, distribution, optimization, Python, short-circuit, tool.

1 INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de las infraestructuras eléctricas, las redes de distribución y subtransmisión desempeñan un papel fundamental en la entrega eficiente y continua de energía eléctrica a los consumidores finales. Sin embargo, la complejidad inherente a estas redes las hace susceptibles a diversas formas de perturbaciones, tales como sobrecargas, cortocircuitos (fallas) o problemas de aislamiento, que pueden dar lugar a interrupciones no planificadas en el suministro de energía. Estas interrupciones no solo generan inconvenientes significativos para los usuarios, sino que también imponen desafíos operativos y económicos a los operadores de la red.

La pronta identificación y localización de las fallas en las redes eléctricas de distribución se presenta como una tarea crítica para mitigar los efectos adversos de las interrupciones. Esta necesidad ha impulsado la búsqueda constante de enfoques y tecnologías innovadoras que permitan a los operadores detectar y abordar rápidamente las anomalías en la red. En este contexto, el presente trabajo se enfoca en explorar y desarrollar una solución basada en el Método de Colonia de Hormigas para la ubicación óptima de localizadores de fallas en redes eléctricas de distribución.

La Colonia de Hormigas, inspirada en el comportamiento colectivo de las hormigas reales, ofrece un punto de vista interesante para abordar problemas de optimización en entornos complejos. Por lo consiguiente, se conceptualizará a cada localizador de falla como una "hormiga virtual" que busca de manera inteligente determinar su ubicación óptima para conseguir la localización de fallas. La interacción entre estas "hormigas virtuales" se modela mediante feromonas virtuales, permitiéndoles comunicarse y colaborar en la búsqueda de soluciones eficientes.

La implementación práctica de este enfoque se llevó a cabo mediante el desarrollo de una herramienta computacional en el lenguaje de programación Python, integrada con el software CYMDIST para modelar una red eléctrica representativa.

El objetivo principal de este proyecto es optimizar la ubicación de los localizadores de falla con el fin de minimizar los tiempos de reparación y maximizar la precisión en la localización de fallas. La importancia de este objetivo radica en su impacto directo en la calidad de vida de los usuarios, así como en la eficiencia operativa de las empresas del servicio público de electricidad.

La versatilidad del Método de Colonia de Hormigas para adaptarse a diferentes topologías de redes y condiciones operativas fue explorado a fondo, destacando su

capacidad para abordar problemas complejos en diversos contextos. La validación de los resultados teóricos mediante simulación es crucial para respaldar la aplicabilidad de la solución, contribuyendo a la confianza en la implementación práctica del método en entornos operativos reales.

Este trabajo busca proporcionar una contribución sustancial al campo de la gestión de fallas en redes eléctricas. Se espera que los resultados obtenidos no solo mejoren la eficiencia operativa de las empresas de servicios públicos, sino que también promuevan la confiabilidad del suministro eléctrico, reduciendo los costos asociados con la interrupción del servicio y las reparaciones.

El presente trabajo está compuesto por varios capítulos, de los cuales se pueden destacar: el marco teórico, donde se expone de forma conceptual el resultado de la revisión de la literatura científica y técnica realizada previamente; la metodología, que contempla la estructura de la herramienta computacional desarrollada en Python, adaptando el algoritmo de optimización de Colonia de Hormigas; y finalmente, resultados, donde se detallan y analizan las soluciones obtenidas mediante la herramienta en diferentes casos de estudio.

1.1 Objetivo General

Desarrollar una herramienta computacional en el lenguaje de programación Python, con el uso del Método de la Colonia de Hormigas, para establecer la ubicación óptima de localizadores de falla en redes de distribución eléctrica.

1.2 Objetivo Especifico

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con localizadores de falla en redes de distribución eléctrica, identificando las tecnologías y enfoques más relevantes y actualizados, además, comprender el funcionamiento y los principios del Algoritmo de la Colonia de Hormigas.
- Adaptar, dentro de una herramienta computacional a ser estructurada, el Algoritmo de la Colonia de Hormigas para su aplicación específica en la ubicación óptima de localizadores de falla en redes de distribución eléctrica, teniendo en cuenta las características y restricciones del problema mediante Python en CYMDIST.
- Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones y casos de estudio para evaluar el desempeño de la herramienta desarrollada y extraer conclusiones

sobre su viabilidad y aplicabilidad en la ubicación óptima de localizadores de fallas.

1.3 Alcance

En el desarrollo del componente se realizará una revisión bibliográfica referente a: Método de Optimización de la Colonia de Hormigas, tecnologías y avances en localizadores de falla y su respectiva ubicación óptima, lenguaje de programación Python e integración de Python con el programa computacional CYMDIST. Posteriormente, se realizará la recopilación de datos de la red eléctrica a ser empleada, incluyendo la topología de la red, ubicación de dispositivos existentes (de ser el caso) y cualquier otra información relevante y necesaria para el análisis.

Se adaptará el Algoritmo de Colonia de Hormigas dentro de una herramienta computacional a ser estructurada utilizando el lenguaje de programación Python, donde se determinará la función objetivo y posibles restricciones para el proceso de optimización.

Se integrará el algoritmo al software CYMDIST donde, mediante la simulación en una red eléctrica de distribución, se podrá realizar pruebas y validar los resultados para su posterior análisis.

La ejecución del trabajo está definida en varias etapas que serán descritas a continuación:

A. Recopilación de datos y planteamiento teórico

Se realizará la recopilación de datos de la red eléctrica, incluyendo la topología de la red, ubicación de dispositivos existentes si es el caso, datos históricos de fallas y cualquier otra información relevante y necesaria para el análisis. Los datos recopilados se procesarán y prepararán para su uso en el análisis de la ubicación óptima de localizadores de falla. De forma simultánea se realizará la revisión bibliográfica de todos los ítems requeridos para el desarrollo del trabajo.

B. Programación e Integración con CYMDIST

Se programará una herramienta computacional que hará uso del Algoritmo de Colonia de Hormigas en el lenguaje de programación Python, para determinar la ubicación óptima de los localizadores considerando una función objetivo y sus respectivas restricciones. La rutina estructurada se integrará a CYMDIST haciendo uso del módulo de Python que incluye dicho software. Se definirán criterios de optimización

que guíen al Algoritmo de Colonia de Hormigas para encontrar la mejor ubicación de los localizadores de falla.

C. Análisis de resultados

Se realizarán pruebas y analizará el funcionamiento de la herramienta desarrollada, utilizando datos de una red eléctrica de prueba modelada en CYMDIST. Se plantearán posibles mejoras en el algoritmo estructurado en función de los resultados obtenidos.

D. Elaboración del documento

Se elaborará el documento escrito donde se documentará el desarrollo, implementación y resultados obtenidos durante el trabajo, presentando los hallazgos y conclusiones obtenidas.

1.4 Marco Teórico

En este capítulo se establecen los cimientos conceptuales, previos al desarrollo del trabajo de integración curricular. Se abordan conceptos, fundamentos y métodos utilizados en el trabajo. El objetivo es orientar al lector mediante una comprensión concreta de los temas a tratar y de la metodología que es propuesta e implementada en el trabajo.

1.4.1 Redes de distribución

Los sistemas o redes de distribución son parte fundamental dentro del sistema eléctrico de potencia, ya que son los encargados de llevar la energía generada a los usuarios finales. La complejidad de estos sistemas radica en que dichos usuarios se encuentran dispersos en territorios de gran tamaño y presentan cargas de múltiples magnitudes dependiendo del sector en que se encuentren, ya sea residencial, comercial o industrial [1].

El objetivo principal de estas redes es llevar la energía eléctrica de manera eficiente y confiable desde las subestaciones de transmisión, donde el voltaje es reducido a magnitudes más acordes a la demanda del sector, hasta los hogares, comercios o industrias donde es requerida. El nivel de voltaje usual en estas redes va desde los 2.4 kV hasta los 34.5 kV en los alimentadores primarios, mientras que en la distribución secundaria se manejan valores de 120/240 V [1]. En Ecuador, a nivel de distribución, los niveles de voltaje más usuales van desde los 6.3 kV hasta los 22.8 kV.

Están conformadas por: una subestación principal de potencia, un sistema de subtransmisión, subestaciones de distribución, alimentadores primarios, transformadores de distribución, secundarios y servicios (postes, interruptores, reguladores, cables, etc.) [1].

1.4.1.1 Topologías de los sistemas de distribución

Las redes de distribución pueden tener diferentes topologías, no obstante, existen dos tipos que son fundamentales en este tipo de redes: las radiales y mallas. La elección de la topología depende de diversos factores, como la densidad de carga y la confiabilidad del suministro [1].

- Sistemas radiales: son aquellas que solo tienen una ruta desde el suministro hasta la carga [1].
- Sistemas mallados: son aquellos que presentan varias ramificaciones interconectadas que dan como resultado múltiples caminos para transferencias de carga [1].

1.4.1.2 Criterio de observabilidad en redes eléctricas

La observabilidad en redes eléctricas se refiere a la capacidad de determinar el estado completo del sistema eléctrico en un momento dado a partir de las mediciones disponibles. En otras palabras, un sistema eléctrico es observable si es posible conocer todas las variables de estado importantes mediante la medición de un conjunto adecuado de variables. Esto es esencial para el monitoreo, control y operación eficiente de la red eléctrica [2].

Es importante señalar que la observabilidad en sistemas de potencia puede verse afectada por la ubicación de las mediciones y la configuración de la red. Además, la colocación estratégica de dispositivos de medición, como medidores de fasores, puede mejorar la observabilidad de la red eléctrica [2]. En resumen, la observabilidad en redes eléctricas es esencial para garantizar una operación segura y eficiente.

1.4.2 Flujo de potencia en redes eléctricas de distribución

El flujo de potencia se refiere a la distribución y circulación de la energía eléctrica, mediante la transferencia de potencia activa (kW) y reactiva (kVA) a través de los elementos de la red. Mediante este proceso se pueden realizar análisis como: análisis de contingencias, equilibrio de fases, control de voltajes, ubicación óptima de

capacitores, despacho de generación distribuida, entre otros, que permiten garantizar que el suministro eléctrico sea eficiente y confiable para los usuarios finales [2].

El análisis del flujo de potencia implica la determinación de las magnitudes y fases de los voltajes en cada nodo de la red, así como las corrientes en las líneas y transformadores. Se considera tanto la potencia activa como la reactiva para evaluar la eficiencia y capacidad de carga de los componentes [2].

En las redes de distribución, las cargas pueden variar a lo largo del día. El flujo de potencia debe adaptarse a estas variaciones para garantizar un suministro constante. La implementación de sistemas de control y automatización contribuye a gestionar eficazmente estos cambios de carga [2].

En teoría, el flujo de potencia en redes eléctricas de distribución es un proceso dinámico y crítico para garantizar la eficiencia y confiabilidad del suministro eléctrico. Su análisis constante y la aplicación de técnicas de optimización contribuyen a mantener un sistema eléctrico robusto y adaptado a las demandas cambiantes.

1.4.3 Cortocircuitos en redes eléctricas de distribución

Los cortocircuitos en redes de distribución eléctrica representan eventos críticos que pueden tener consecuencias significativas en la operación y la seguridad del sistema. Un cortocircuito ocurre cuando hay una conexión de baja impedancia entre dos puntos de un circuito, resultando en una corriente excesiva y potencialmente dañina [3].

Los cortocircuitos pueden ser causados por diversos factores, como fallas en el aislamiento, contacto accidental con objetos conductores, o condiciones atmosféricas adversas. Estas condiciones pueden conducir a una corriente descontrolada que fluye por una trayectoria no prevista. El impacto de un cortocircuito puede ser considerable, pues puede provocar daños en equipos, interrupciones en el suministro eléctrico y, en casos extremos, representar riesgos para la seguridad del sistema y las personas [3]. La magnitud de la corriente en un cortocircuito puede ser muy superior a la capacidad nominal del sistema.

Hay diversos tipos de cortocircuitos que se clasifican según su origen y características. Los más comunes son [3]:

- Cortocircuitos trifásicos: Evento en el cual se establece una conexión de baja impedancia entre las tres fases de un sistema eléctrico trifásico.
- Cortocircuitos Bifásicos: Evento que ocurre cuando hay un contacto directo entre dos conductores de fases diferentes.

- Cortocircuitos bifásicos a tierra: Evento que se produce cuando hay un contacto directo y de baja impedancia entre dos fases de un sistema eléctrico y la tierra.
- Cortocircuitos monofásicos a tierra: Evento que se produce cuando hay un contacto directo y de baja impedancia entre una fase del sistema eléctrico y la tierra.
- Cortocircuitos simétricos: Son aquellos en los que las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero son iguales. Este tipo de cortocircuito puede modelarse fácilmente y se utiliza en análisis de cortocircuitos trifásicos simétricos.
- Cortocircuitos asimétricos: Se produce cuando las impedancias de secuencia son diferentes, lo que puede deberse a condiciones de desbalance en la red. Los cortocircuitos asimétricos son más complejos de analizar y pueden generar corrientes y voltajes desiguales en cada fase.

Para mitigar los efectos de los cortocircuitos, las redes de distribución están equipadas con dispositivos de protección como fusibles, interruptores automáticos y relés de protección [3]. Estos dispositivos actúan rápidamente para aislar la sección afectada y evitar daños mayores.

El análisis de cortocircuitos implica la evaluación de las condiciones de operación y la capacidad de respuesta del sistema ante tales eventos. La localización precisa de cortocircuitos es esencial para una intervención rápida y eficiente [3].

La incorporación de tecnologías avanzadas, como sistemas de monitoreo en tiempo real y dispositivos inteligentes, permite una detección y respuesta más rápidas ante cortocircuitos. Esto mejora la resiliencia y la capacidad de adaptación de la red.

1.4.4 Optimización por Colonia de Hormigas

El método de optimización por Colonia de Hormigas (Ant Colony Optimization, ACO) es un algoritmo metaheurístico basado en el comportamiento de las colonias de hormigas en la naturaleza. Fue introducido por Marco Dorigo en la década de 1990 y se ha utilizado para abordar problemas de optimización combinatoria [4].

Se basa en la observación del comportamiento contemplado en las colonias de hormigas, quienes encuentran el camino más corto hacia una fuente de alimento mediante la comunicación a través de feromonas. Las feromonas sirven como una especie de "memoria colectiva" de la colonia [4].

El problema por resolver se representa en forma de grafo como se muestra en la Figura 1.1 donde los nodos representan posibles soluciones y las aristas indican la factibilidad

de pasar de una solución a otra. En términos más generales, puede aplicarse a problemas combinatorios donde se busca una solución entre múltiples opciones. En el ACO, las "hormigas artificiales" construyen soluciones iterativamente. Cada hormiga sigue un camino posible en el espacio de búsqueda de soluciones [4].

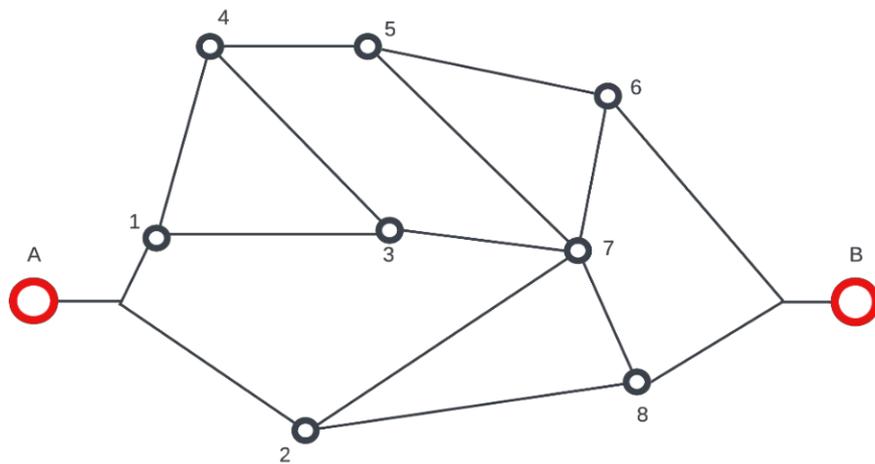


Figura 1.1. Representación gráfica de un problema a resolver por el algoritmo de Colonia de Hormigas.

Se evalúa la calidad de las soluciones construidas por las hormigas. Se actualizan las feromonas de acuerdo con la calidad de las soluciones encontradas. Las soluciones de mejor calidad reciben una mayor cantidad de feromonas y se repiten los pasos de construcción, evaluación y actualización durante un número determinado de iteraciones o hasta que se cumpla un criterio de convergencia [5].

El ACO tiene varios parámetros ajustables, como la tasa de evaporación de feromonas, la importancia relativa de las feromonas y la heurística en la selección de rutas, entre otros. Estos parámetros pueden influir en el rendimiento y la convergencia del algoritmo [4].

El Método de Colonia de Hormigas es apreciado por su capacidad para encontrar soluciones de alta calidad en problemas complejos y combinatorios. La naturaleza descentralizada y adaptativa del algoritmo lo hace robusto y aplicable a una amplia gama de situaciones [4][5].

1.4.5 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos han demostrado ser una herramienta poderosa y versátil en la búsqueda de soluciones óptimas para problemas complejos de optimización, debido a su capacidad para explorar eficientemente grandes espacios de soluciones. Inspirados

en los principios de selección natural y genética de Darwin, estos algoritmos simulan el proceso de evolución biológica, permitiendo que las soluciones más aptas prevalezcan y mejoren a lo largo de generaciones sucesivas [6].

La estructura fundamental de los algoritmos genéticos implica la creación de una población inicial de soluciones potenciales, conocidas como individuos o cromosomas, que son evaluados en función de una medida de aptitud o "fitness". Los individuos más aptos tienen mayores probabilidades de ser seleccionados para la reproducción, mediante operaciones de cruzamiento y mutación, generando así nuevas poblaciones que heredan las características de los individuos más exitosos de la generación anterior [7]. Este proceso iterativo continúa hasta alcanzar un criterio de terminación, como un número fijo de generaciones o una solución que satisfaga un umbral de aptitud predefinido.

Una de las principales ventajas de los algoritmos genéticos es su adaptabilidad a una amplia gama de problemas de optimización complejos, donde las técnicas tradicionales pueden fallar o ser ineficientes. Esto incluye, pero no se limita a, optimización de rutas, composición musical y programación de operaciones [8]. Además, su naturaleza estocástica permite la exploración de múltiples regiones del espacio de búsqueda simultáneamente, aumentando la probabilidad de encontrar soluciones globalmente óptimas [9].

La aplicación de algoritmos genéticos en la optimización de procesos de producción ha demostrado ser particularmente fructífera. Estos algoritmos han facilitado la mejora continua de la eficiencia operativa, la reducción de costos y el aumento sostenido de la productividad en entornos industriales complejos [10]. Estudios de caso y ejemplos prácticos han ilustrado cómo los algoritmos genéticos pueden identificar soluciones óptimas o cercanas a la óptima en situaciones que involucran múltiples objetivos y restricciones, a menudo resultando en mejoras significativas en rendimiento y calidad de los procesos de producción [10].

Para garantizar la eficacia de los algoritmos genéticos, es crucial personalizar y adaptar su implementación a las características específicas de cada problema. Esto incluye la definición de una función objetivo adecuada, la selección de operadores genéticos apropiados y la configuración de parámetros como el tamaño de la población y las tasas de cruzamiento y mutación [10]. A pesar de los desafíos que implica su diseño y ajuste, los algoritmos genéticos ofrecen una metodología robusta y flexible para la resolución de problemas de optimización, demostrando su valor en una amplia gama de aplicaciones prácticas.

1.4.6 Localizadores de fallas en redes eléctricas de distribución

Los dispositivos localizadores de fallas en redes eléctricas son instrumentos diseñados para detectar, identificar y ubicar la ubicación exacta de una interrupción o falla en un sistema eléctrico, como cortocircuitos, fallos a tierra, entre otros [11]. Estos dispositivos desempeñan un papel crucial en la gestión y mantenimiento de redes eléctricas de distribución, ya que permiten a los operadores localizar rápidamente las interrupciones y tomar medidas correctivas de manera eficiente [12]. A continuación, se proporcionan los principios de funcionamiento y tecnologías comunes asociadas con los dispositivos localizadores de fallas.

Principios de funcionamiento

La investigación ha explorado diversas metodologías para abordar la localización de fallas, desde el análisis matemático del sistema eléctrico hasta la implementación de algoritmos y sistemas de monitoreo en tiempo real. Sin embargo, estos métodos enfrentan el desafío de la variabilidad en el modelo del sistema eléctrico, afectando su precisión [11]. A continuación, se exponen los métodos más relevantes dentro de la localización de fallas eléctricas:

- *Método Acústico:*

Estos dispositivos detectan sonidos generados por la falla, como arcos eléctricos, y utilizan la velocidad del sonido para calcular la distancia hasta el punto defectuoso [11].

- *Métodos de Medición de Impedancia:*

Estos dispositivos utilizan técnicas de medición de impedancia para analizar la variación en la impedancia de la línea afectada cuando ocurre una falla. La medición se realiza comparando la impedancia aparente antes y después de la falla para determinar la distancia a la ubicación de esta [14].

- *Análisis de Ondas Viajeras:*

Algunos dispositivos localizadores de fallas analizan las ondas viajeras generadas por la perturbación, calculando el tiempo que tarda en llegar a diferentes puntos de la red. La diferencia en los tiempos de llegada permite determinar la distancia a la falla [13].

- *Métodos de Corriente y Voltaje:*

Estos dispositivos pueden utilizar la medición de corriente y voltaje en diferentes puntos de la red para calcular la ubicación de la falla. La variación en estos parámetros se analiza para identificar la posición relativa de la falla [14].

Una estrategia sugerida para superar estas limitaciones implica utilizar mediciones de voltaje y corriente tanto en la subestación como en la fuente de generación distribuida (GD), aprovechando el conocimiento del estado operativo del sistema en el momento de la falla [14].

Tecnologías utilizadas

Los localizadores de fallas en redes eléctricas requieren utilizar nuevas tecnologías que permitan mejor la obtención y el análisis de datos, según el principio de funcionamiento bajo el que estén contruidos, así como también, la comunicación entre ellos. Por tanto, se exponen algunas tecnologías utilizadas en la actualizada:

- *Sistemas de posicionamiento global (GPS):*

Muchos localizadores de fallas están equipados con tecnología GPS para determinar la ubicación precisa del dispositivo y, por ende, de la falla en la red eléctrica [14][15].

- *Comunicación inalámbrica:*

Algunos dispositivos utilizan tecnologías de comunicación inalámbrica para transmitir datos en tiempo real a los operadores, facilitando la toma de decisiones y la coordinación de las actividades de reparación [15].

- *Sensores avanzados:*

La integración de sensores avanzados, como acelerómetros y sensores de corriente, permite recopilar datos adicionales que pueden mejorar la precisión en la localización de fallas [15].

- *Inteligencia artificial (IA):*

Algunos localizadores de fallas emplean algoritmos de inteligencia artificial para analizar patrones de comportamiento de la red eléctrica y mejorar la identificación y localización de fallas [15].

Un enfoque innovador en la localización de fallas es la aplicación de la firma del sistema, basada en el análisis del comportamiento de las corrientes en situaciones de falla y su relación con las protecciones del sistema [11]. Combinada con métodos tradicionales, esta estrategia promete mejorar la precisión en la localización de fallas con un costo computacional reducido [11].

En resumen, el desarrollo de localizadores de fallas en redes eléctricas de distribución ha evolucionado desde estrategias basadas únicamente en modelos eléctricos hacia la integración de tecnologías de medición avanzadas y análisis de datos en tiempo real. Estos avances no solo permiten una localización más precisa de las fallas, sino que también contribuyen a una gestión más eficiente del sistema eléctrico, asegurando la continuidad y calidad del suministro de energía eléctrica [11][12][11][14][15].

1.4.7 Python y su integración con CYMDIST

Python es un lenguaje de programación abierto de alto nivel y de propósito general. Se destaca por su sintaxis clara y legible, lo que facilita la comprensión y escritura del código [16]. Utiliza una sintaxis sencilla y un estilo de escritura indentado, lo que lo hace muy accesible para programadores principiantes, además, cuenta con una amplia documentación oficial, tutoriales en línea, libros y una comunidad activa que brinda soporte ante cualquier inquietud. Esto facilita el aprendizaje y la resolución de problemas.

Por otro lado, CYMDIST es un paquete base para el análisis del sistema de distribución del software CYME (Computer Aided Engineering for Electric Power Systems), donde se agrupan todas las herramientas de simulación, modelación y análisis de sistemas eléctricos de distribución, en especial, en entornos de suministro eléctrico de bajo y medio voltaje [17].

CYMDIST permite la creación detallada y la representación gráfica de sistemas de distribución eléctrica, incluyendo transformadores, líneas de distribución, interruptores, y otros componentes. En temas de análisis, se pueden realizar flujos de potencia, cálculos de cortocircuito, coordinación de protecciones, análisis dinámicos del comportamiento de sistemas de distribución, estudios de calidad de energía, análisis de pérdidas, optimización de redes y análisis de estabilidad [17].

Python cuenta con una librería conocida como *CyMPy* desarrollada para interactuar con CYME, no obstante, también es compatible con otras librerías como *Numpy*, *Pandas*, etc. [16][18]. CYMDIST cuenta con un módulo integrado de Python que permite realizar la programación del algoritmo requerido desde el mismo programa y enlazarlo con la base de datos de la red directamente; sin embargo, también es posible desarrollar el programa desde otros ambientes de programación para luego pasarlo a la consola interna [17].

El módulo de Python permite a los usuarios acceder a las funcionalidades de análisis antes mencionadas como flujos de potencia y cortocircuitos, de forma que se

automaticen los procesos de análisis y brindar flexibilidad para el análisis de datos, extracción de información de los elementos de la red, visualización de la condición de la red bajo diversos casos de estudio, entre otras tareas relacionadas [18].

En este módulo se tienen varias opciones tales como: una lista de scripts creados, botón de ejecución de los scripts, herramientas de edición y una consola de programación. Los scripts se pueden ejecutar desde la barra de herramientas o desde la herramienta de edición, no obstante, se pueden crear pruebas desde la consola externa sin necesidad de crear un script previamente [18].

Por tanto, CYMDIST es utilizado por ingenieros y profesionales en el campo de la distribución eléctrica para realizar estudios de ingeniería, evaluar el rendimiento del sistema, realizar modificaciones en la red, etc., y su integración con Python ha hecho de estos estudios de análisis más eficientes para la toma de decisiones con base en la información del diseño y la operación de las redes eléctricas de distribución.

2 METODOLOGÍA

Este capítulo detalla la metodología utilizada para determinar la ubicación óptima de localizadores de falla en redes eléctricas de distribución empleando el Método de Colonia de Hormigas, dentro de lo cual se describe también el desarrollo del algoritmo de optimización en Python. En primer lugar, se describe la formulación y conceptualización del problema bajo el que se estructura este trabajo, destacando los elementos clave que influyen en la toma de decisiones del algoritmo. A breves rasgos se brinda una explicación paso a paso de la lógica subyacente en cada fase del algoritmo, proporcionando una comprensión clara de su funcionamiento.

El algoritmo completo es presentado en texto plano y entregado como archivo ejecutable en los anexos de este documento.

2.1 Estructura general de la metodología

En esta sección se presenta el flujo general, ilustrado en la Figura 2.1, del proceso bajo el que se desarrolla el Trabajo de Integración Curricular, el cual, inicializa con la apertura del software CYME, donde se procede a modelar el sistema eléctrico de distribución (SED) que se desea analizar.

A partir del SED que se ha modelado se obtiene la información de la líneas y dispositivos disponibles en la red, tal como el nombre de las líneas, la distancia de cada una de ellas, número de fases, etc., información que será necesaria para la ejecución del algoritmo de optimización. Una vez modelado el sistema, se procede a realizar ciertos estudios que permiten obtener información necesaria para el algoritmo de optimización.

El primer estudio por realizar es un análisis de cortocircuitos en cada una de las líneas, donde se deben evaluar los tipos de cortocircuitos más importantes, se analizan los resultados obtenidos y se almacenan únicamente las corrientes de cortocircuito de menor magnitud obtenidas en cada línea. Posteriormente, se realiza un flujo de potencia, del cual se extrae y almacena únicamente la información de la corriente de flujo en cada línea en condiciones de demanda máxima. Toda esta información se almacena en una base de datos interna del sistema.

Con los datos obtenidos de la modelación, los estudios de cortocircuito y flujo de potencia, se procede a crear una red o matriz de conectividad que simula el grafo que las hormigas virtuales deben considerar para la elección del mejor camino.

Al tener los posibles caminos por donde las hormigas pueden circular, se ejecuta el algoritmo de Colonia de Hormigas a la par con el algoritmo genético, permitiendo que aleatoriamente en cada generación se vayan variando las corrientes umbrales (ajuste de los localizadores para iniciar el proceso de ubicación de fallas) y las distancias máximas entre localizadores, función que garantiza que el sistema sea observable en su totalidad.

Estos datos son los que van variando para la Colonia de Hormigas, una cierta cantidad de generaciones hasta converger en la mejor solución, saliendo del bucle y dando como resultado: el tramo donde se ubicará cada localizador, la corriente de flujo de potencia en la línea y la corriente umbral con la que se configura el localizador de falla.

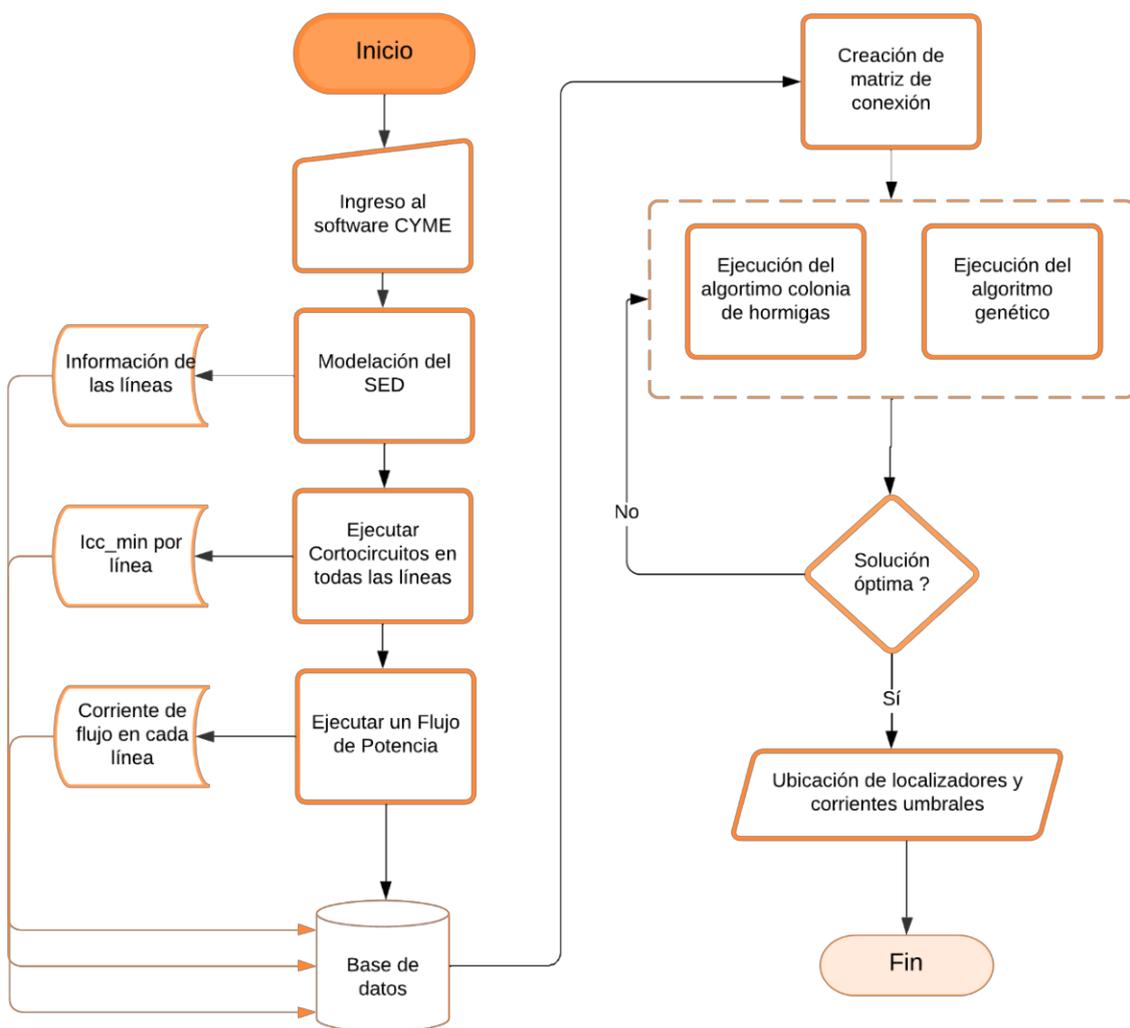


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la estructura general de la metodología desarrollada.

2.2 Modelación del SED

Dentro del software CYMDIST de CYME, como ya se estableció en el marco teórico, se puede modelar sistemas eléctricos de distribución, ya sea desde cero, o importando bases de datos previamente modeladas. Adicionalmente, se cuenta con redes de validación para el usuario que pueden ser usadas para realizar cualquier tipo de estudio, como sería el caso de una red de prueba para el presente trabajo.

El primer paso implica acceder al software, crear un nuevo proyecto y proporcionar información básica como nombre, ubicación geográfica y frecuencia de la red. Utilizando la caja de herramientas de dibujo, se introducen componentes del sistema, como nodos, líneas, generadores, transformadores, dispositivos de protección, etc., con sus características físicas y eléctricas correspondientes.

En el contexto de este trabajo, es crucial definir con precisión las líneas y nodos de conexión. El programa extrae información relevante de las líneas, como el nombre del elemento, la longitud, las fases y el tipo. CYMDIST clasifica las líneas en cuatro tipos:

- Línea aérea equilibrada.
- Línea aérea desequilibrada.
- Línea aérea por fase.
- Cable.

Estos detalles son esenciales para el análisis posterior mediante el algoritmo implementado en Python. Una vez finalizada la modelación, se obtiene una representación digital del sistema eléctrico de distribución, con todos sus componentes y características.

Esta representación sirve como base para llevar a cabo estudios y análisis posteriores de gran importancia para garantizar la continuidad del trabajo, tales como flujos de potencia y análisis de cortocircuitos.

2.2.1 Análisis de cortocircuitos

Con la red de distribución eléctrica definida se procede a realizar el análisis de cortocircuitos en cada línea del SED. Este estudio es ejecutado desde el algoritmo de Python donde se analizan los siguientes tipos de cortocircuitos:

- Cortocircuitos Trifásico (LLL).
- Cortocircuitos Bifásico a Tierra (LLG).

- Cortocircuitos Bifásico (LL).
- Cortocircuitos Monofásico a Tierra (LG).

Es decir, el algoritmo va simulando los cuatro tipos de cortocircuito en la primera línea seleccionada, luego compara la magnitud de las corrientes internamente y almacena la menor entre las cuatro magnitudes. El proceso se repite en cada una de las líneas subsiguientes. Se almacena la menor corriente de cortocircuito pues, en el caso de que un localizador de falla sea requerido en la línea bajo análisis, este valor será el límite superior (no ajustable) de la corriente umbral del localizador.

Para el análisis de cortocircuitos, la falla se la simula sobre la línea, no sobre la barra, por tanto, se selecciona el porcentaje de la línea al que se desea que se ejecute la falla eléctrica, así como la impedancia de falla. Para este trabajo se considera una falla franca (debido a los arcos eléctricos de pequeña magnitud que se presentan en los alimentadores de distribución), lo que implica que la impedancia de falla es cero. El porcentaje de la línea al que se va a simular la falla es definido por el usuario, no obstante, se recomienda que sea lo más cercano a los extremos de las líneas, ya que se busca que el localizador observe el elemento en su totalidad.

El código que ejecuta el cortocircuito se puede observar en el Anexo I-I adjunto a este documento.

2.2.2 Simulación de flujos de potencia

Una vez que se tienen los datos de cortocircuito se realiza la simulación de flujos de potencia en el sistema eléctrico de distribución modelado bajo un escenario de demanda máxima, del cual se obtiene la corriente de flujo en cada línea (corriente máxima de carga que representa el límite inferior no ajustable de la corriente umbral del localizador de fallas, en el caso de requerirse uno de estos dispositivos en las líneas bajo análisis).

De forma similar que el análisis de cortocircuito, la simulación de flujos de potencia se ejecuta de forma automática mediante el algoritmo de optimización desarrollado en Python. Se configura el número de iteraciones y el nivel de voltaje de tolerado. Finalmente, se van almacenando los datos del sistema, así como las corrientes obtenidas de los estudios en una base de datos interna. La rutina computacional de esta sección se encuentra en el Anexo I-II adjunto a este documento.

2.2.3 Creación de matriz de conexión

La matriz de conexión o el grafo bajo el que las hormigas van a considerar su camino se conforma a partir de la información almacenada en la base de datos. La matriz va a estar constituida por:

- El nombre de la línea.
- El nodo donde inicia cada línea.
- El nodo donde termina cada línea.
- La corriente de flujo de potencia.
- La corriente de cortocircuito mínima.
- La longitud de cada línea.

La finalidad de esta matriz es que las hormigas reconozcan los caminos que están conectados entre sí, es decir, donde sí existe flujo de corriente, y busquen aleatoriamente el tramo que consideren óptimo para pasar según las condiciones del problema.

2.3 Algoritmo Genético

El algoritmo genético desarrollado sigue el flujo que se presenta en el esquema de la Figura 2.2 y el código se puede visualizar en el Anexo I-III. La rutina computacional inicia con la parametrización inicial del algoritmo, donde se define:

- El tamaño de la población.
- Número de generación.
- La probabilidad de mutación.
- El tamaño del arreglo de cada generación, el cual es igual al número de tramos que se tienen en la red.

Con estos datos se crea una población inicial de soluciones (individuos). Cada individuo tiene dos conjuntos de genes:

- Corriente Umbral (mulCorrFlujo)
- Distancia (disVistaLoc).

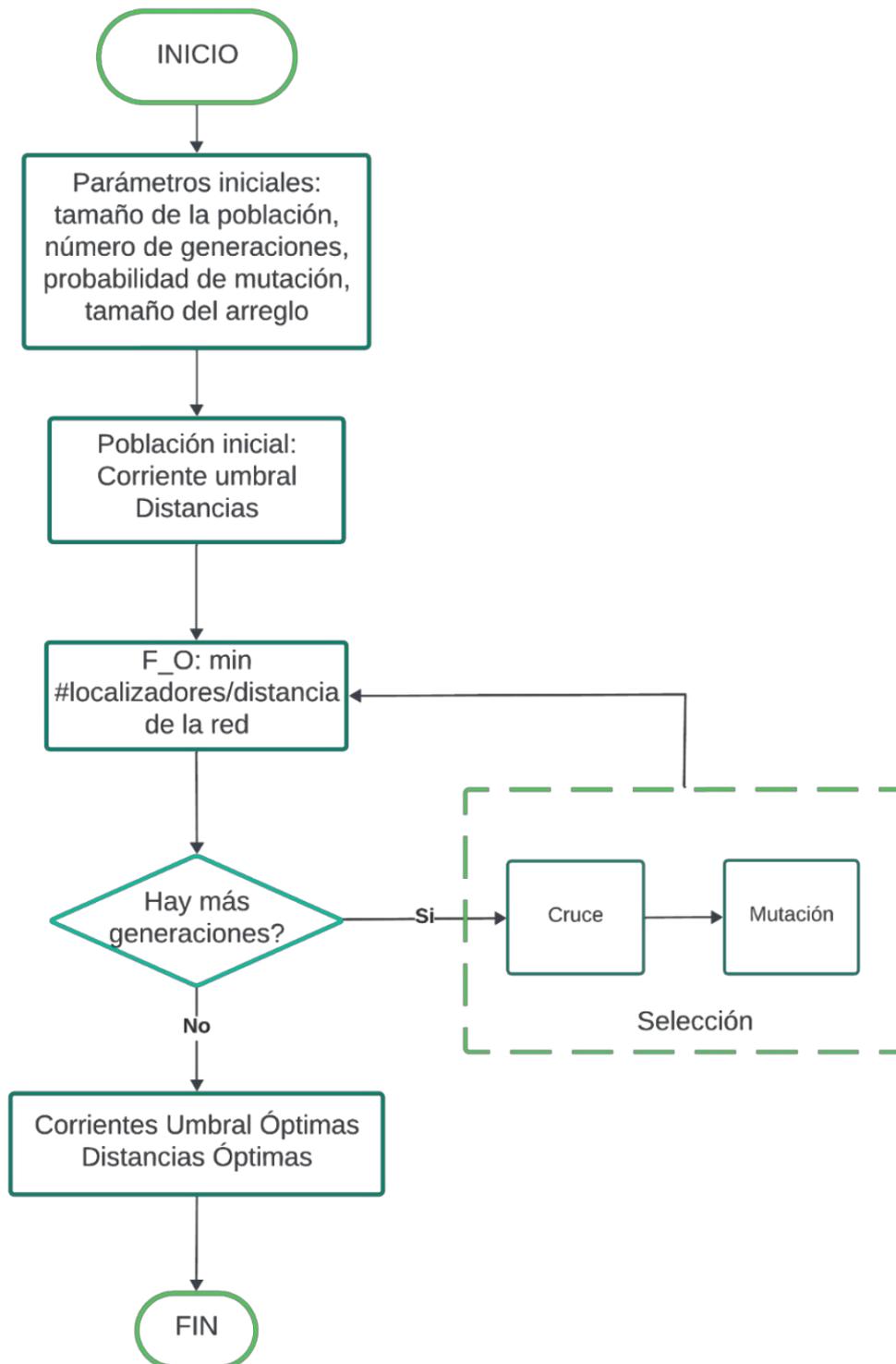


Figura 2.2. Diagrama de flujo del algoritmo genético.

Estos genes representan los parámetros a optimizar, los cuales van a ser creados con valores aleatorios que pueden ser ingresados por el usuario según su criterio de ingeniería y las características del dispositivo que desea configurar. Se podrá ingresar un rango de valores bajo los cuales se requiere que el algoritmo genético se ejecute para obtener el mejor arreglo de corrientes y distancias para cada localizador.

El siguiente paso es ingresar al proceso de evaluación de la función objetivo para cada individuo en la población. Si hay más generaciones entra en proceso de selección de individuos, donde los individuos se ordenan en función de la evaluación de la función objetivo. Luego, se selecciona un porcentaje de los individuos para la reproducción.

En este trabajo, se selecciona el 50% de los mejores individuos, para garantizar equidad probabilística; sin embargo, se puede considerar tomar un porcentaje menor o mayor de individuos para la reproducción, lo que puede conllevar a una convergencia más rápida o lenta del algoritmo. Al utilizar la biblioteca establecida para este método, la selección del porcentaje se realiza de forma aleatoria y automática.

Dentro del proceso de selección se ejecuta el cruce y la mutación, es decir, se realiza el cruce entre los individuos seleccionados para crear descendencia. Se selecciona un punto de corte aleatorio y se combinan los genes de los padres para formar nuevos individuos (hijos), así como también, se aplica una mutación a los genes de los individuos de la descendencia. La mutación introduce pequeñas perturbaciones aleatorias en los genes con una probabilidad determinada.

Finalmente, se evalúa el número de generaciones que han transcurrido y se comparan con el número ingresado inicialmente. Si ya no hay más generaciones para realizar cruces y mutaciones, el algoritmo sale de bucle y devuelve la corriente umbral y la distancia óptimas entre localizadores para cada dispositivo.

2.4 Algoritmo de Colonia de Hormigas

La rutina computacional bajo la que se rige el algoritmo de Colonia de Hormigas se puede ver expresada mediante el diagrama de flujo propuesto en la Figura 2.3 y se encuentra codificado en texto plano en el Anexo I-IV. El algoritmo de Colonia de Hormigas, en el contexto de este trabajo, es implementado y utilizado para encontrar la ubicación óptima de localizadores de falla en una red eléctrica.

En primero lugar, se debe parametrizar las condiciones iniciales que rigen el algoritmo, los cuales son:

- El número de iteraciones.
- Número de hormigas.
- Feromona inicial.
- Tasa de evaporación de feromonas.

Con estos parámetros se crea una población inicial de hormigas, donde cada hormiga representa un posible conjunto de localizadores en la red eléctrica, así como también se crea una variable donde se almacena la cantidad de feromonas que van dejando las hormigas en cada línea.

Se construye una solución bajo la premisa del movimiento de las hormigas a través de la red, la hormiga inicia su recorrido desde un nodo inicial, el cual se configura en la cabecera del alimentador; sin embargo, el punto de partida puede establecerse en cualquier nodo de la red. Se crea un conjunto de nodos visitados para realizar un seguimiento de los nodos que ya han sido recorridos por la hormiga.

Luego se obtiene la corriente máxima en un nodo determinado entre las corrientes de cortocircuito almacenadas en la base de datos, lo cual hará alusión a los pesos de cada camino. La hormiga selecciona una línea solo si:

- El nodo de conexión inferior (aguas abajo) de la línea no ha sido visitado previamente.
- La corriente de falla de la línea supera la corriente de falla actual.

Cuando la hormiga selecciona una línea, la agrega a su solución y el nodo de conexión inferior de la línea se marca como visitado en “nodos visitados”. Luego ingresa a la función de “*selección_línea_probabilística*”, donde se selecciona el siguiente camino según la cantidad de feromonas depositas en la línea.

Las feromonas en las líneas se actualizan antes de cada iteración, de forma que éstas se evaporan en todas las líneas, simulando su pérdida natural en el tiempo. Esto se logra mediante la multiplicación de las feromonas por el factor de evaporación definido inicialmente. Las feromonas en las líneas de la red eléctrica son utilizadas por las hormigas virtuales para comunicar información sobre la calidad de las soluciones encontradas.

La ecuación utilizada para la evaporación es [5]:

$$Feromona_{ij} = (1 - factor_{evaporación}) \times feromona_{ij} \quad (2.1)$$

Donde:

Feromona_{ij}: Se refiere a la cantidad de feromonas entre la línea que va de $i \rightarrow j$.

factor_{evaporación}: Es el parámetro que controla la tasa a la cual las feromonas se evaporan.

Luego de que las hormigas han construido sus soluciones, se agregan feromonas en las líneas que forman parte de la solución de alta calidad, bajo la expresión matemática (2.2), siendo este incremento proporcional a la calidad de la solución [5].

$$Feromona_{ij} = feromona_{ij} + factor_{evaporación} \times feromona_{ij} \quad (2.2)$$

Estas operaciones combinadas de evaporación e incremento de feromonas permiten que el algoritmo guíe la búsqueda hacia soluciones más prometedoras en el espacio de búsqueda. A medida que las hormigas exploran y encuentran soluciones de calidad, la información sobre estas soluciones se refleja en las feromonas, influenciando las elecciones de las hormigas futuras.

El siguiente paso es evaluar si se han recorrido todos los tramos o si se han concluido el número de iteraciones propuestas, si no es así, se siguen creando soluciones hasta salir del bucle para que finalmente el algoritmo devuelva la mejor solución. La mejor solución está basada en el peso de cada tramo que, para este caso de aplicación, hace referencia a la corriente de cortocircuito máxima que se tiene en cada línea.

Como ya se conoce, el algoritmo tiene como objetivo minimizar costos o caminos, no obstante, debido a la naturaleza del problema, en este trabajo se busca negar esa función (minimizar el negativo de la función) y hacer que las hormigas sigan el camino que presente el tramo más largo con corrientes de cortocircuito significativas dentro del rango de la corriente umbral y la distancia que fue definida para el localizador, minimizando así la utilización (número) de localizadores por tramo sin perder observabilidad.

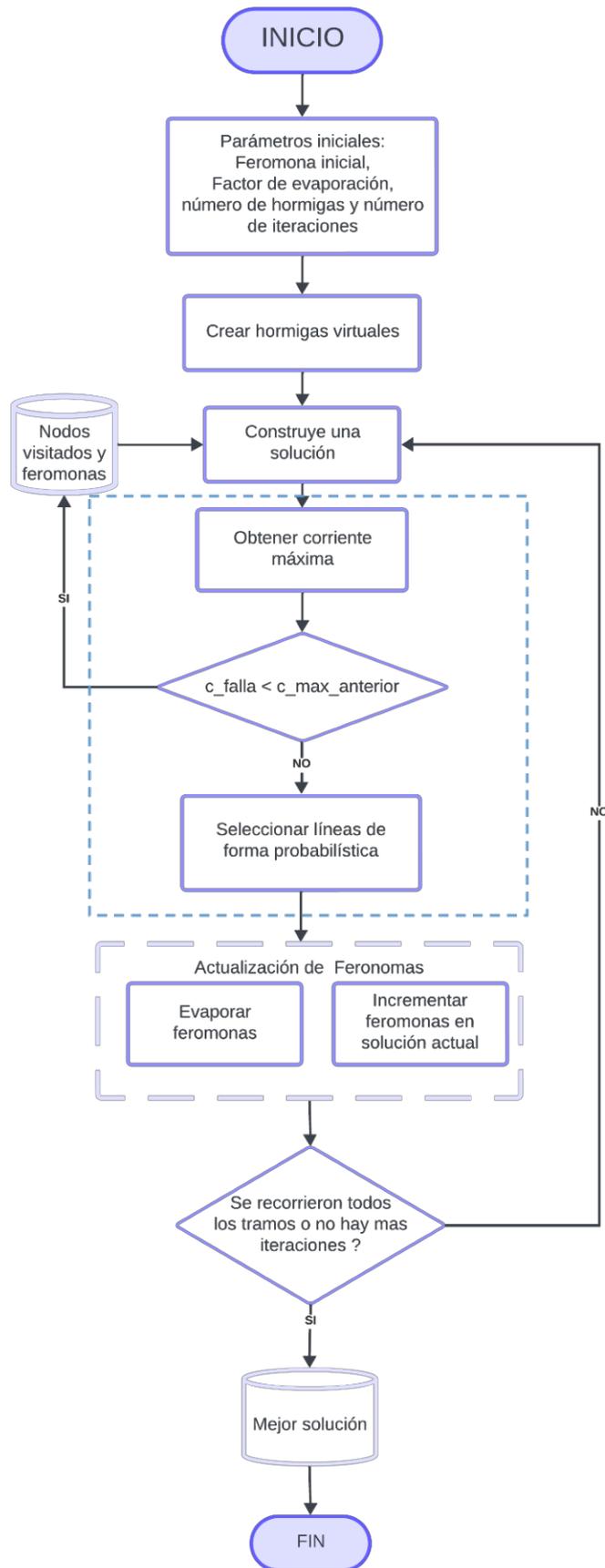


Figura 2.3 Diagrama de flujo del algoritmo de Colonia de Hormigas.

2.5 Función Algoritmo

Finalmente, para la obtención de la solución óptima, que garantice la observabilidad del sistema y la ubicación óptima de los localizadores, se utiliza la función *algoritmo*, la cual describe su rutina como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.4.

Por medio de esta función se genera un proceso de optimización que utiliza un algoritmo híbrido, puesto que combina la Colonia de Hormigas y el algoritmo genético. Primero, se ingresan los parámetros de entrada, que son:

- Líneas.
- Corriente umbral.
- Distancia.
- Cantidad de hormigas que van a ejecutar la ruta.

Los datos de corriente umbral y distancia, son los obtenidos mediante el algoritmo genético.

Luego se llama a la función *algoritmo Colonia de Hormigas* para obtener una solución mediante este método. Se utiliza un bucle interno que se ejecuta mientras no se haya encontrado una solución válida, es decir, que debe cumplir ciertos criterios con respecto a la corriente umbral y la distancia que puede visualizar el localizador, los cuales se describen en las ecuaciones (2.3) y (2.4).

$$I_{cc_{min}} > I_{umbral} \quad (2.3)$$

$$Distancia_{mín_{localizador}} < Distancia_{sugerida} < Distancia_{máx} \quad (2.4)$$

Donde:

$I_{cc_{min}}$: Corresponde a la corriente de cortocircuito mínima del tramo obtenida del análisis previo de cortocircuitos.

I_{umbral} : Corresponde a la corriente umbral que se obtiene del algoritmo genético.

$Distancia_{mín_{localizador}}$: Corresponde a la distancia mínima que debe existir entre localizadores.

$Distancia_{máx}$: Corresponde a la distancia máxima que debe existir entre localizadores para garantizar comunicación entre ellos.

Con respecto a las distancias que puede ver los localizadores, el usuario puede definir los límites mínimos y máximos dependiendo de las características y restricciones del dispositivo. Para este caso, en el presente Trabajo de Integración Curricular, se propone un límite de 3 km a 10 km, siendo 3 km el mínimo y 10 km el máximo.

Por tanto, la distancia sugerida por el algoritmo genético debe estar dentro de dicho rango para ser considerada como una posible solución. Dentro del bucle, se irán generando un conjunto de líneas "solución" producto de la función de Colonia de Hormigas.

Se crea una lista de nuevos dispositivos basándose en las líneas que fueron seleccionadas como solución, se actualiza la lista de líneas y se eliminan las líneas seleccionadas por el algoritmo, para que se descarte como una solución nuevamente, y a su vez se ajusta el vector de las corrientes umbrales eliminando el valor de las líneas que han sido sustraídas.

Luego, se procede a identificar si las líneas son visibles y que sean parte de la mejor solución dada por el algoritmo de Colonia de Hormigas, para así actualizar la lista de líneas, las corrientes umbrales y los dispositivos localizadores con los resultados obtenidos, y almacenar estos en una base de datos.

La visibilidad (observabilidad) de las líneas se la consigue mediante la función "*vis*", la cual es la responsable de medir o comprobar la visibilidad de las líneas de la red, a partir de un conjunto dado de líneas, que es representado con el vector de dispositivos que se va generando.

La función "*vis*" toma como entrada un conjunto de localizadores, la lista completa de las líneas y las distancias permitidas para cada línea. Se crea una variable de tipo conjunto para evitar duplicados donde se almacenen las líneas visibles.

El ciclo itera a través de cada localizador ubicado en la red, previamente configurado con la corriente umbral y distancia de visualización (observabilidad), siempre que esté presente una conexión aguas abajo con una línea. Se crea un vector que almacena las conexiones disponibles y 2 vectores adicionales que se reinician en cada iteración pero que guardan la información actual de la conexión aguas abajo del localizador y el valor de corriente de cortocircuito mínima en ese tramo.

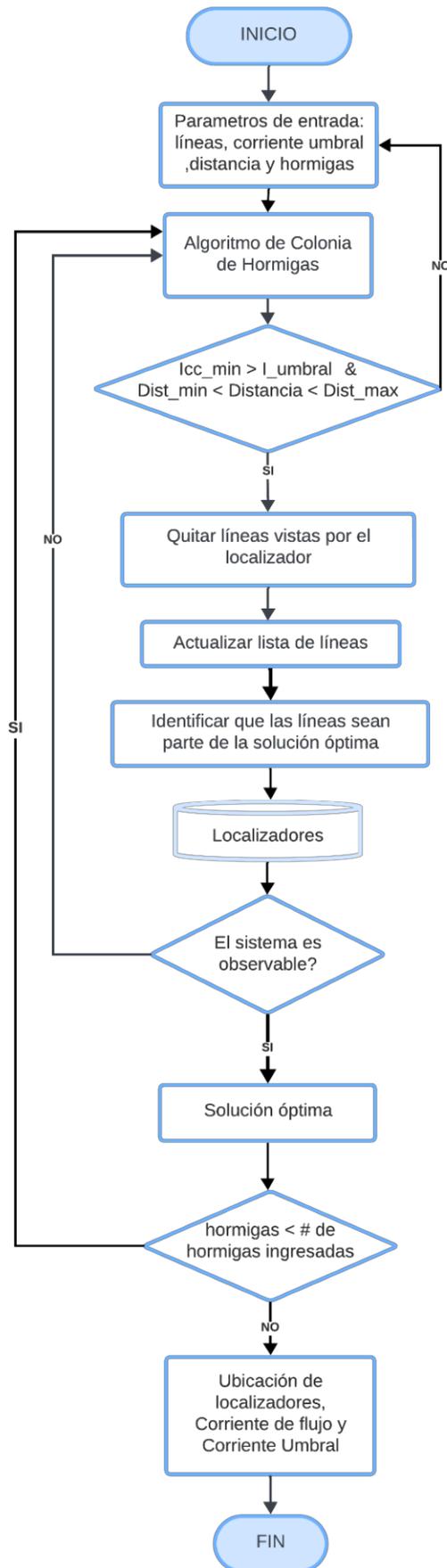


Figura 2.4. Diagrama de flujo de la función global “algoritmo”.

En la siguiente iteración, se verifica si la conexión aguas arriba del dispositivo coincide con la última conexión aguas abajo almacenada y si la línea cumple el criterio de corriente umbral y distancia, guardando tanto la ubicación del localizador y la suma de las distancias de los tramos observados, datos que se almacenan en el conjunto de localizadores, luego se actualizan las listas de conexiones y corrientes.

Si las líneas ya no son observables o no cumplen con los criterios de verificación, mediante una variable de incremento se agrega otro localizador. Cuando ya no hay más localizadores que ubicar, la función devuelve las líneas visibles y la lista de localizadores actualizada.

Para concluir, si el sistema es observable, del algoritmo de Colonia de Hormigas se obtiene la mejor solución para ese grupo de localizadores, la cual será la ubicación óptima para esa iteración, caso contrario, se vuelve a generar otro grupo de “hormigas virtuales”, y se reevalúa el proceso.

El bucle continúa hasta que el número de hormigas utilizadas sea igual al número de hormigas que se tenían disponibles, dando como resultado la ubicación óptima de los localizadores, la corriente de flujo en el tramo donde se ubica el localizador y la corriente umbral bajo la cual se configura el localizador.

Con esto se concluye la descripción de la metodología utilizada en el desarrollo del presente trabajo y de la herramienta computacional para optimizar la ubicación de localizadores de falla en redes eléctricas de distribución, considerando todos los fundamentos y conceptos establecidos en el marco teórico, para dar paso al siguiente capítulo donde se aplica esta metodología en redes eléctricas de distribución modeladas en CYMDIST y así obtener resultados para su respectivo análisis.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la extensión de este capítulo, se exponen los resultados obtenidos junto con sus respectivos análisis, de la metodología previamente definida, aplicada en dos redes de distribución eléctrica, posterior a la ejecución del algoritmo desarrollado en Python mediante el software CYME versión 9.3 (es importante que el usuario conozca este requerimiento en la versión del software).

La primera aplicación o caso de estudio, corresponde a una red de prueba de 17 nodos obtenida de una sección de la red estándar IEEE de 33 nodos, la cual fue extraída de la guía de validación para el usuario que proporciona el software CYMDIST, y que cuenta con toda la información necesaria de la red para que el algoritmo sea ejecutado. El segundo caso de estudio se realiza sobre un alimentador primario de distribución real de 120 nodos perteneciente a la Empresa Eléctrica Ambato S.A (EEASA) cuya base de datos fue provista por la misma institución para fines educativos; no obstante, está disponible en el Sistema de Información Geográfica (SIG) de la EEASA para su exportación [19].

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis de los resultados, así como también de la metodología implementada para el desarrollo del Trabajo de Integración Curricular.

3.1 Red de 17 nodos del IEEE

El sistema eléctrico de distribución seleccionado como red de prueba es de topología radial que cuenta con 17 nodos, 16 líneas áreas trifásicas y 15 cargas concentradas de 252.60 MVA en total. La red cuenta con una fuente de 12.66 kV_{LL} equilibrada y las impedancias equivalentes se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Impedancias equivalentes de la fuente de la red de 17 nodos.

	$R [\Omega]$	$X [\Omega]$
Z1	3.378	20.269
Z2	3.378	20.269
Z0	17.708	71.301

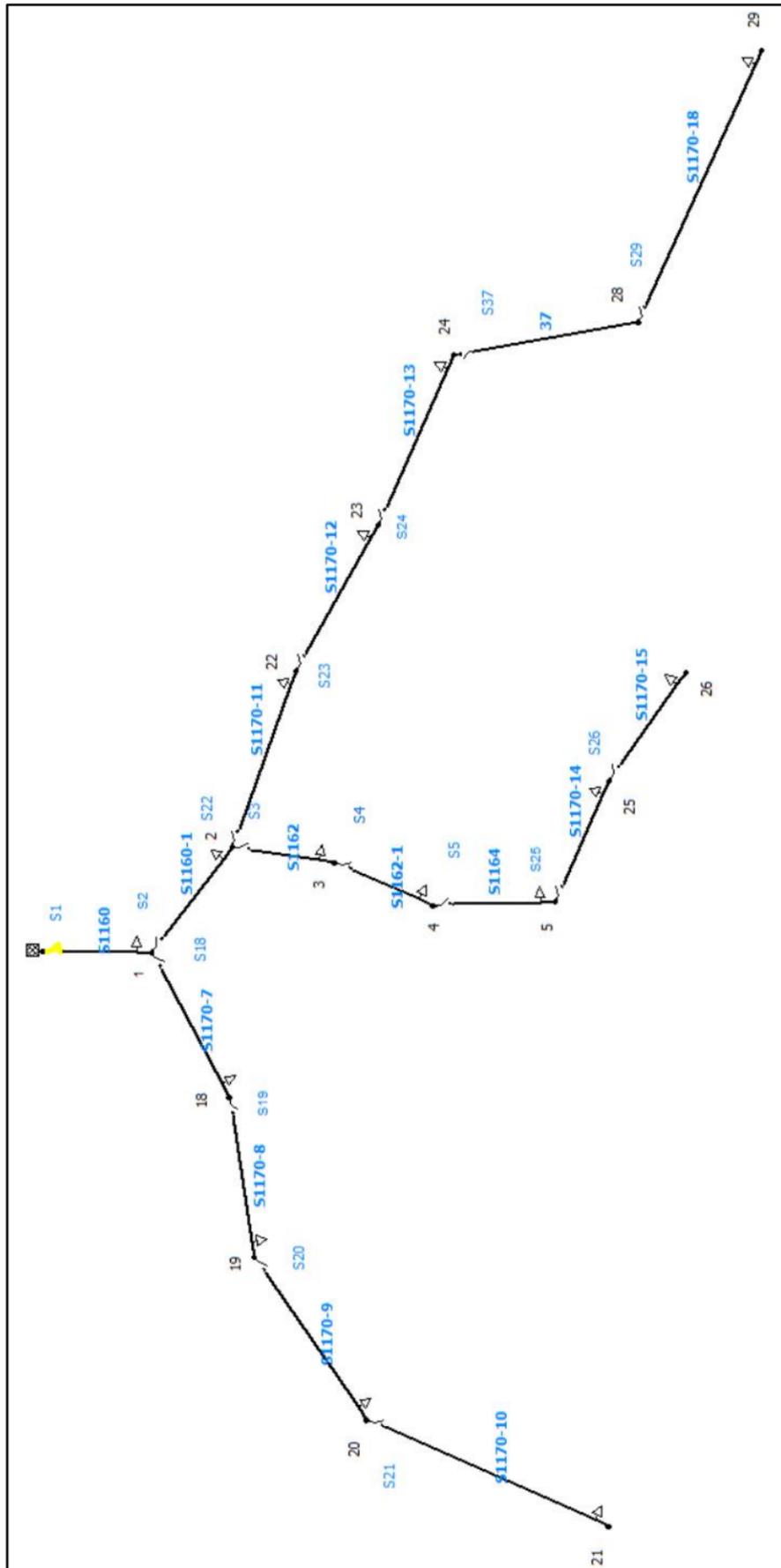


Figura 3.1. Esquema de la Red de Prueba de 17 nodos del IEEE.

En la Figura 3.1 se muestra el esquema de red seleccionada previo a obtener los resultados del algoritmo ejecutado en el módulo de Python, es decir, en condiciones iniciales. Para la ejecución de la herramienta se consideran las siguientes condiciones iniciales:

Análisis de Cortocircuitos

- Porcentaje de línea donde ocurren las fallas: 1%
- Impedancias de falla: 0Ω

Análisis de flujo de potencia

- Número máximo de iteraciones: 120
- Voltaje tolerable: 0.01 p.u

Algoritmo de Colonia de Hormigas

- Número de hormigas: 100
- Número de iteraciones: 100
- Feromona inicial: 0.1
- Porcentaje de evaporación de feromonas: 0.01

Algoritmo Genético

- Tamaño de la población: 5
- Número de generaciones: 10
- Probabilidad de mutación: 0.1
- Factores de multiplicación mínimo y máximo de la corriente umbral: 1.2 – 1.8.
- Rango de distancias entre localizadores: 3 km – 10 km.

Por otra lado, en la Figura 3.2 se puede observar los resultados de la ejecución del algoritmo, donde se expone la cantidad de localizadores de falla obtenidos con sus respectivas ubicaciones óptimas y configurados con las corrientes umbrales sugeridas para cada uno, garantizando la observabilidad del sistema.

En la Figura 3.2, se presentan los resultados que arrojó el programa en la sección de reportes al ejecutar el script "*Colonia_de_Hormigas*" directamente desde la barra de tareas. El tiempo de ejecución del programa para esta red de prueba es de aproximadamente 10 min, debido a la cantidad de iteraciones que se deben realizar, tanto del algoritmo de Colonia de Hormigas como del algoritmo genético.

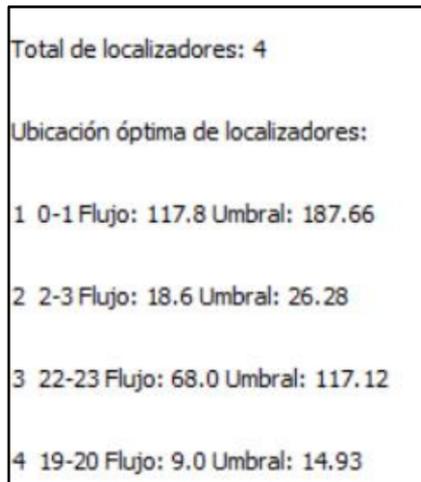


Figura 3.2. Reporte de resultados obtenidos de la red de prueba de 17 nodos del IEEE.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a través de una tabla resumen, la cual refleja la información detallada en la Figura 3.2. En dicha tabla, se destacan los segmentos de línea donde se ubican los localizadores de falla, así como la corriente de flujo en la línea y la corriente umbral de cada localizador, junto con las líneas que han sido objeto de observación por parte del localizador.

Tabla 3.2. Resumen de resultados del caso de prueba en la red de 17 del IEEE.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOCALIZADORES				
#	Tramo	Corriente de Flujo [A]	Corriente Umbral [A]	Líneas observadas
1	0 - 1	117.8	187.66	S1160 / S1160-1 / S1170-11 / S1170-7
2	2 - 3	18.6	26.28	S1162 / S1162-1 / S1164 / S1170-14 / S1170-15
3	22-23	68	117.12	S1170-12 / S1170-13 / 37 / S1170-18
4	19 - 20	9	14.93	S1170-9 / S1170-10

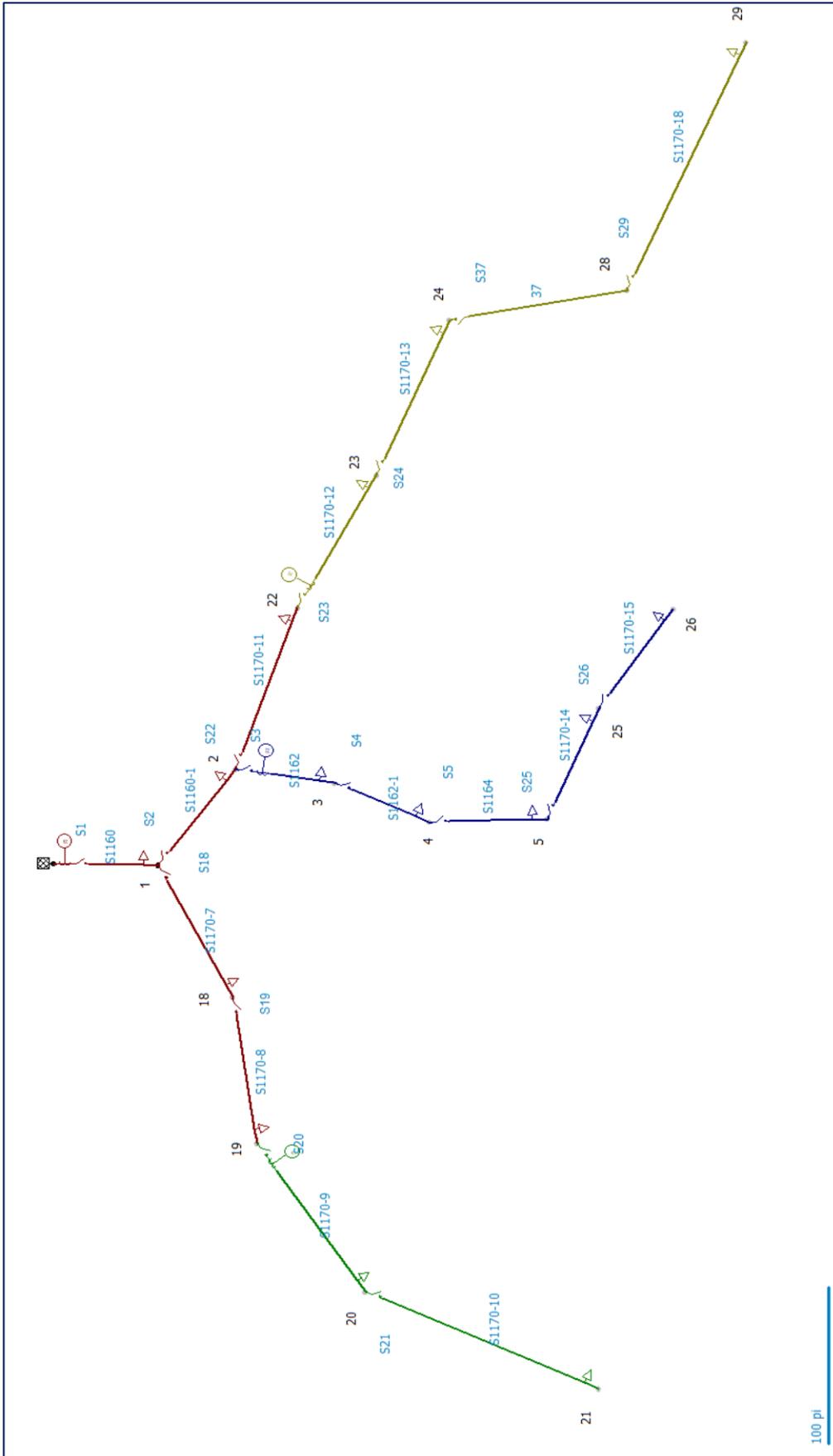


Figura 3.3. Esquema resultante de la red de prueba de 17 nodos del IEEE, destacando la ubicación de los localizadores de falla.

Analizando los resultados se destaca que, para esta red de 17 nodos, únicamente fueron necesarios 4 localizadores, los cuales configurados adecuadamente con las corrientes umbrales encontradas observan toda la red y son capaces de detectar una falla dentro del área visible de cada localizador. Gráficamente, en la Figura 3.3 se puede visualizar la ubicación de los localizadores en la red y a su vez distinguir, mediante colores, los tramos que observa cada localizador.

Por tanto, la herramienta computacional desarrollada en Python y ejecutada mediante el software CYMDIST, es capaz de optimizar la ubicación de los localizadores de fallas y además minimizar el número de dispositivos a colocarse en la red, garantizando la observabilidad del sistema.

3.2 Alimentador de 120 nodos de la Empresa Eléctrica de Ambato

Para el caso de estudio de un sistema eléctrico de distribución real se ha seleccionado un alimentador de la Empresa Eléctrica Ambato (EEASA) de topología radial que cuenta con 120 nodos, 119 tramos de red conformados por líneas áreas por fase y cables, 8 cargas concentradas de 33.72 kVA en total y una fuente de alimentación de 13.8 kV_{LL} equilibrada con impedancias equivalentes que se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Impedancias equivalentes de la fuente de la red de 120 nodos EEASA.

	$R [\Omega]$	$X [\Omega]$
Z1	0.273	1.883
Z2	0.274	1.887
Z0	0.054	1.08

En la Figura 3.4 se presenta el esquema eléctrico del alimentador de la Empresa Eléctrica Ambato seleccionado, en condiciones iniciales. Para este caso de análisis se considera variar las condiciones iniciales del algoritmo de Colonia de Hormigas, puesto que el tiempo de simulación es bastante alto al ser una red de mayor tamaño que la de prueba.

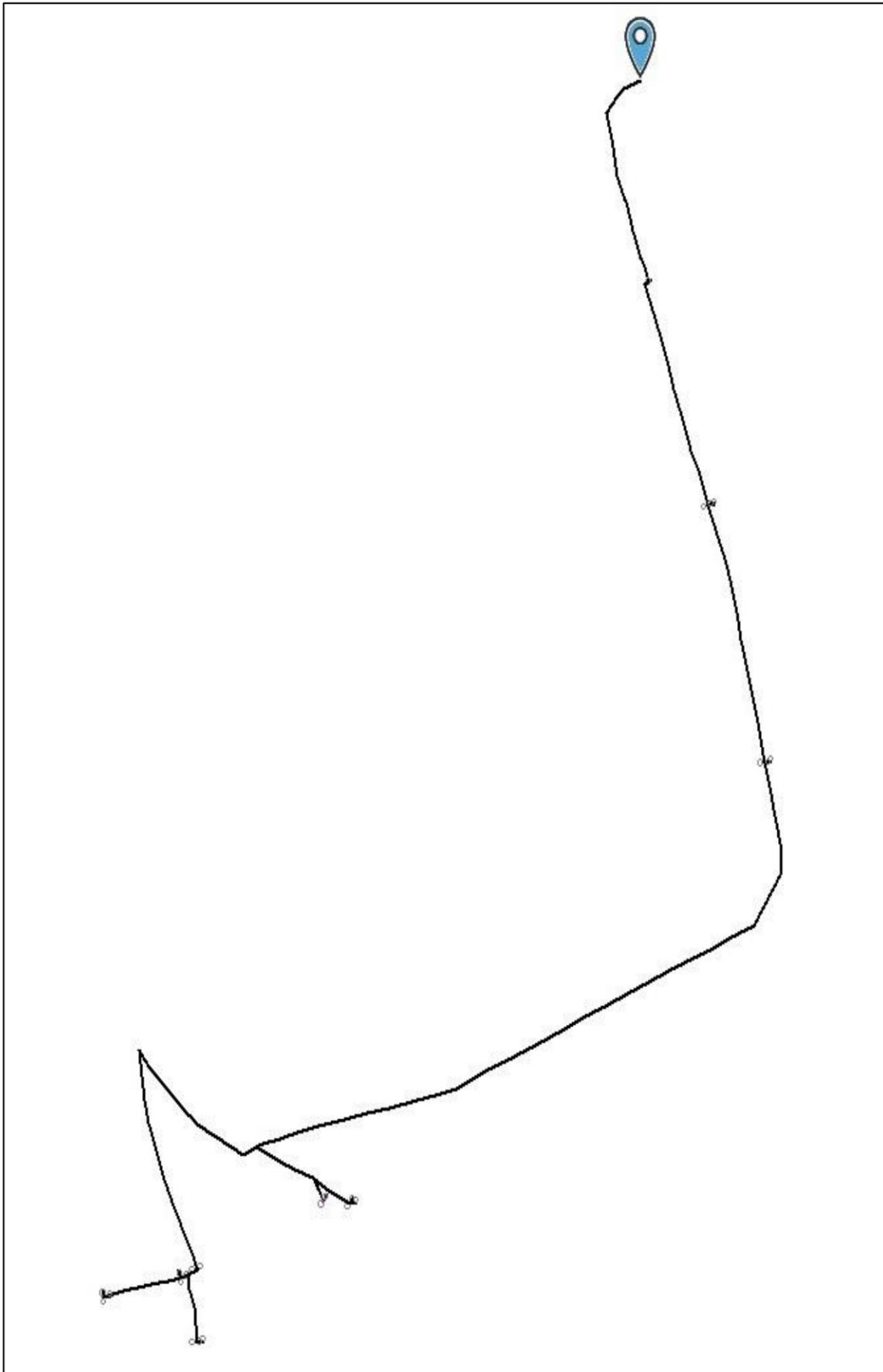


Figura 3.4. Esquema de la Red Real de 120 nodos de la EEASA.

Por tanto, para las variaciones realizadas al algoritmo se considera una conjunto de 50 hormigas y 50 iteraciones a diferencia del caso de prueba. Una vez ejecutada la herramienta computacional, mediante la consola de Python provista por CYMDIST, se obtuvieron los resultados que se exponen en la Figura 3.5, donde se presenta la solución óptima encontrada bajo los parámetros establecidos.

```

Total de localizadores: 13
Ubicación óptima de localizadores:
1  110-108   Flujo: 2.6 Umbral: 3.94
2  96-115   Flujo: 0.3 Umbral: 0.37
3  10004007-1 Flujo: 1.4 Umbral: 1.91
4  14-13    Flujo: 1.4 Umbral: 2.09
5  68-69    Flujo: 0.3 Umbral: 0.38
6  14-15    Flujo: 1.5 Umbral: 2.11
7  70-69    Flujo: 0.3 Umbral: 0.51
8  71-70    Flujo: 0.3 Umbral: 0.48
9  71-72    Flujo: 0.1 Umbral: 0.18
10 71-79    Flujo: 0.2 Umbral: 0.27
11 111-107  Flujo: 7.7 Umbral: 11.56
12 103-115  Flujo: 0.1 Umbral: 0.13
13 103-104  Flujo: 0.1 Umbral: 0.17

```

Figura 3.5. Resultados obtenidos para la red de 120 nodos de la EEASA, desde la consola de Python.

Adicionalmente, los resultados que se presentan en la Figura 3.5 se obtuvieron desde la consola de Python, mediante el editor de Python, al ejecutar el script “*Colonia_de_Hormigas_2*”, debido a la forma en que están definidas las líneas, según se lo estable en el manual de usuario adjunto en el Anexo II.

A pesar de que se considera la disminución del número de iteraciones y de hormigas en la ejecución del algoritmo, el tiempo de simulación del programa computacional para esta red es de aproximadamente 1 hora 15 min, es decir que, si se considerará un mayor número de iteraciones el tiempo de ejecución sería mucha más alto o se requeriría de un computador con mayor capacidad de procesamiento de datos, para poder ejecutarlo exitosamente.

Mediante un resumen expuesto en la Tabla 3.4, se presentan los resultados obtenidos de la herramienta computacional a partir de la información detallada en la Figura 3.5, señalando la ubicación de los localizadores, la corriente de flujo y la corriente umbral del localizador, adicionando también los tramos de red que son objeto de observación por parte del localizador.

Tabla 3.4. Resumen de resultados del caso de estudio real de la red de 120 nodos de la EEASA.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOCALIZADORES

#	Tramo	Corriente de Flujo [A]	Corriente Umbral [A]	Líneas observadas
1	10004007-1	1.4	1.91	326014_MTS/ 209201_MTS/ 327395_MTS/ 326425_MTS/ 325541_MTS/ 325543_MTS/ 325515_MTS/ 325514_MTS/ 325537_MTS/ 325538_MTS/ 325539_MTS/ 327377_MTS/ 325540_MTS
2	13 - 14	1.4	2.09	9200_MTA
3	14 - 15	1.5	2.11	6417_MTA/ 46315_MTA/ 24760_MTA/ 24761_MTA/ 47246_MTA/ 46673_MTA/ 46674_MTA/ 24762_MTA/ 710718_MTA/ 47616_MTA/ 47618_MTA/ 47619_MTA/ 24763_MTA/ 46293_MTA/ 46294_MTA/ 24764_MTA/ 24765_MTA/ 47444_MTA/ 46963_MTA/ 46964_MTA/ 842146_MTA/ 842159_MTA/ 842160_MTA/ 842481_MTA/ 842482_MTA/ 842483_MTA/ 842484_MTA/ 842485_MTA/ 842486_MTA/ 842487_MTA/ 842488_MTA/ 842489_MTA/ 842490_MTA/ 842491_MTA/ 842492_MTA/ 842493_MTA/ 842493_MTA/ 842494_MTA/ 842495_MTA/ 842496_MTA/ 842497_MTA/ 842497_MTA/ 842498_MTA/ 842499_MTA/ 824500_MTA/ 824501_MTA/ 824502_MTA/ 824503_MTA/ 824504_MTA/ 1240613_MTA/ 1240614_MTA/ 824505_MTA/ 1499018_MTA/ 824506_MTA/ 824507_MTA/ 824508_MTA/ 193539_MTS/ 193538_MTS/ 842152_MTA/ 842153_MTA/ 842154_MTA/ 842155_MTA/ 842156_MTA/ 842157_MTA/ 842158_MTA/ 1345586_MTA/ 274259_MTS/ 1710718_MTA/ 710718_MTA/7107017_MTA
84	68 - 69	0.3	0.38	1240615_MTA
5	69 - 70	0.3	0.51	29781_MTA
6	70 - 71	0.3	0.48	29780_MTA

7	71 - 72	0.1	0.18	32754_MTA/ 145153_MTA/ 145155_MTA/ 711507_MTA/ 711508_MTA/ I711508_MTA
8	71 - 79	0.2	0.27	30238_MTA/ 717443_MTA/ 717444_MTA/ I717444_MTA
9	96 - 115	0.3	0.37	29966_MTA/ 281296_MTA/ 281345_MTA/ 30309_MTA/ 257650_MTA/ 257650_MTA/ 30307_MTA/ 30308_MTA/ 711105_MTA / 711106_MTA/ 716889_MTA/ 716890_MTA/ I716890_MTA
10	103 - 104	0.1	0.17	62751_MTA/ 25104_MTA/ 712303_MTA/ 712304_MTA
11	115 - 103	0.1	0.13	257750_MTA
12	110 - 108	2.6	3.94	I711106_MTA
13	111 - 107	7.7	11.56	I712304_MTA

Finalmente, en la Figura 3.6 se muestran los resultados obtenidos de forma gráfica, donde se resalta directamente en la red, la ubicación de los localizadores mediante flechas, debido a que la red es muy grande y no son observables los componentes del sistema, además, a través de colores se exponen las zonas visualizadas por cada uno de los dispositivos.

Se puede concluir, con base en los resultados, que la herramienta computacional desarrollada cumple con su función en una red real, ya que, de 120 nodos se ubicaron óptimamente 13 localizadores, además, se puede notar una optimización notable de dispositivos que garantizan la observabilidad de todo el sistema, lo que se traduce en un menor costo de inversión para la empresa en pro de mejorar la confiabilidad del sistema.

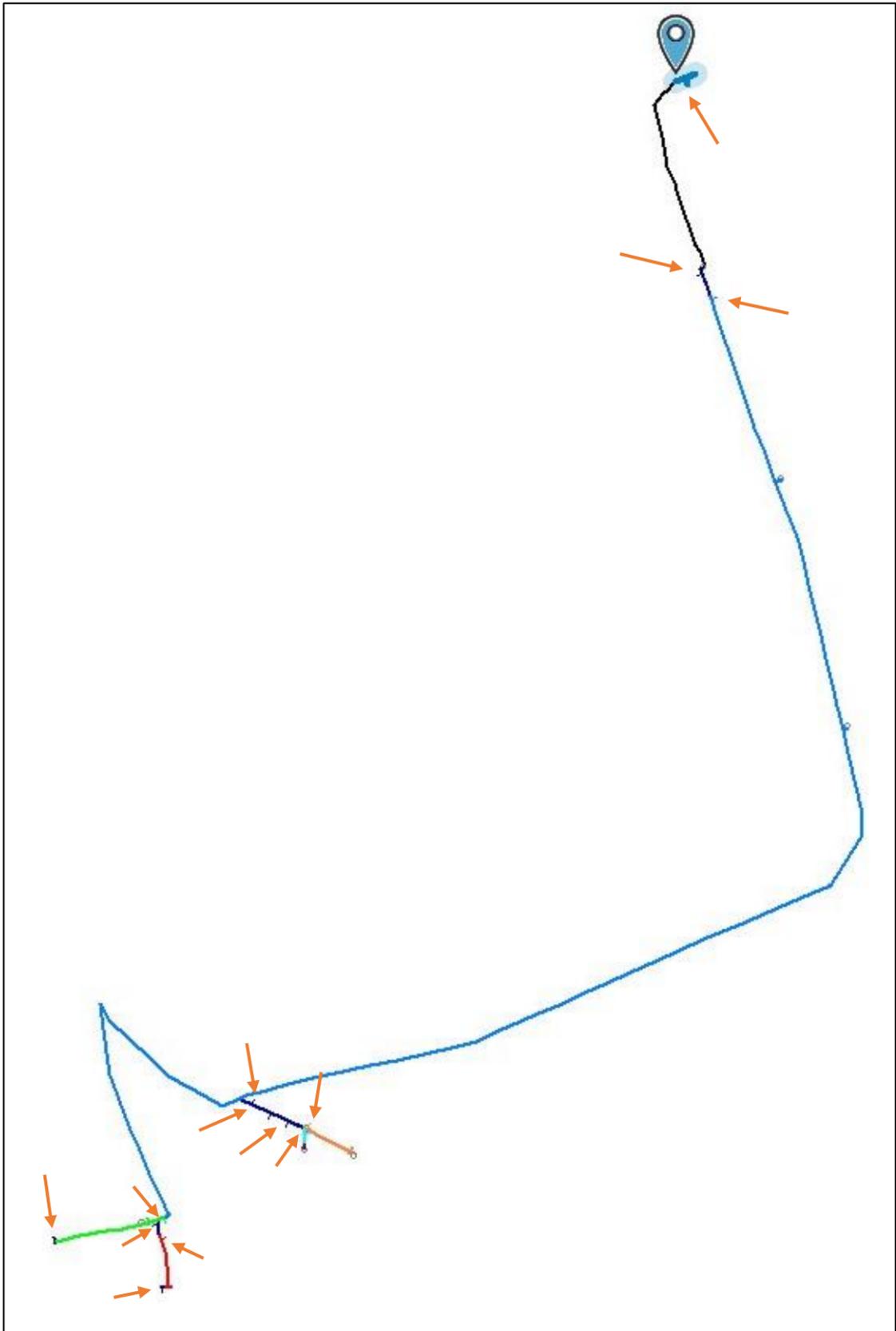


Figura 3.6.Esquema resultante de la red real de 120 nodos de la EEASA, destacando la ubicación óptima y observabilidad de los localizadores de falla.

3.3 Conclusiones

La revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica proporcionó una comprensión profunda de las tecnologías y enfoques relevantes en localizadores de falla, así como de los principios del Algoritmo de la Colonia de Hormigas y de los Algoritmos Genéticos.

La adaptación de este algoritmo dentro de la herramienta computacional considera las características y restricciones específicas del problema de ubicación óptima de localizadores de falla en una red eléctrica de distribución en el contexto de CYMDIST.

La implementación de la herramienta computacional en Python, utilizando el Método de la Colonia de Hormigas, ha sido exitosa. Se logró estructurar un algoritmo que permite establecer la ubicación óptima de localizadores de falla en redes de distribución eléctrica, así como también, minimizar el número de dispositivos ubicados en la red con sus respectivas corrientes umbrales óptimas.

La adaptabilidad de la rutina computacional a diferentes infraestructuras eléctricas, como se evidenció en la red de prueba y en la red real, resalta la versatilidad de la herramienta para su aplicación en distintos contextos (académico y profesional).

El algoritmo de Colonia de Hormigas ha demostrado ser eficiente para buscar soluciones en el espacio de búsqueda definido por la red eléctrica. La adaptabilidad de este método y la capacidad de las hormigas virtuales para explorar y seleccionar caminos basados en el peso de las corrientes de falla y de flujo de potencia, ha contribuido a encontrar soluciones viables para la ubicación óptima de localizadores de falla.

Los resultados obtenidos en los casos de estudio han sido analizados meticulosamente. La herramienta demostró un desempeño satisfactorio en la ubicación óptima de localizadores de falla. La viabilidad y aplicabilidad del algoritmo se sustentan en conclusiones derivadas de la evaluación de los escenarios simulados.

En redes eléctricas de distribución poco robustas, la rutina computacional se ejecuta con mayor facilidad y en menor tiempo, como en el caso de la red de prueba, mientras que en redes robustas el tiempo de ejecución es sumamente alto y requiere de mayores recursos de procesamiento computacional.

3.4 Recomendaciones

Se recomienda explorar estrategias para optimizar el tiempo de ejecución de la herramienta, especialmente al considerar redes de distribución eléctricas más grandes. Esto podría incluir técnicas de paralelización o algoritmos más eficientes.

La personalización de los parámetros claves como distancias mínimas y máximas y coeficientes de corrientes umbrales, se debe realizar considerando las necesidades de la empresa y del dispositivo a instalar, puesto que, si la distancia entre localizadores es muy grande el tiempo que le tomará a la cuadrilla encontrar la falla, en el tramo observado por el localizador, será mucho más alto.

Debido a la limitación de recursos de procesamiento de datos computacionales, se recomienda ejecutar la rutina computacional en redes con un número inferior a 200 nodos, ya que, el comportamiento de los algoritmos presenta un crecimiento exponencial con respecto al almacenamiento de datos, provocando que el tiempo de ejecución sea elevado y se agoten más recursos del procesador.

La herramienta podría beneficiarse de actualizaciones periódicas basadas en la retroalimentación de casos reales y la evolución de la red eléctrica, lo que garantizaría su relevancia y efectividad a lo largo del tiempo.

En general, la herramienta computacional muestra un gran potencial para la optimización de la ubicación de localizadores de falla en redes eléctricas de distribución, pero se sugiere un proceso continuo de ajuste y validación para mejorar su desempeño y aplicabilidad en diversos escenarios.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] J. D. Juárez, "Sistemas de distribución de energía eléctrica" 1 ed., Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, México: Universidad Autónoma Metropolitana, 1995, pp. 11-15.
- [2] J. Duncan Glover, Thomas J. Overbye y Mulukutla S. Sarma, "Power System Analysis and Design," Cengage Learning, 5ª edición, Estados Unidos, 2017, pp. 10-22,81-90.
- [3] R. Camacho, "Localización de fallas en redes de distribución eléctrica por sensado comprimido (compressive sensing)", Universidad Politécnica Salesiana, 2017, Quito, pp. 5-10.
- [4] M. Dorigo and T. Stützle, "Ant Colony Optimization Algorithms for the Traveling Salesman Problem," in Ant Colony Optimization, MIT Press, 2004, pp. 65-119.
- [5] "Algoritmo de la Colonia de Hormigas Con Python," 2022, YouTube. Available : https://www.youtube.com/watch?v=bCy7iroW4yU&ab_channel=EIT%C3%BAneldelMisterio.
- [6] Magnago, H., "Algoritmos evolutivos aplicados a problemas de diseño de redes confiables," pp. 47, 2006. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/0bf2483ebc42ac35e749b54df49950ba3d8340b3>
- [7] Casarrubias-Vargas, H., "Algoritmos Genéticos en el Problema de Picking," pp. 5-6, 2020. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/176915ad2f5d092103306c7277344a67c86beac0>
- [8] Acuña-Galván et al., "Generación de horarios mediante algoritmos genéticos," pp. 2, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/6abc6561321cc73d8ed9bd377ea98d1f44410b4c>
- [9] Achaerandio, Y.S., "Análisis de micropoblaciones para la mejora de la eficacia en computación evolutiva interactiva," pp. 102, n.d. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/243c697eb9def018055ee02c05952e505dcc3cc7>
- [10] Guerrero et al., "Optimización de procesos de producción mediante el uso de algoritmos genéticos," p. 2-7,58. 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/8c56740130712308cb40c8cd70daa4bd2781a0fb>

- [11] Zapata-Tapasco et al., "Metodología híbrida basada en el regresor knn y el clasificador boosting para localizar fallas en sistemas de distribución", pp. 2, 1970. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/5aab7184bc4e490c8ec38fc8b91e75a3af66d69c>
- [12] Peláez-Álzate et al., "Estrategia colaborativa basada en la reactancia de falla y la firma del sistema para la localización de fallas en sistemas de distribución", pp. 2, 1969. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/837a549cad9ae79e2f05acf5109c9fbee136be94>
- [13] SEL, "Localización de Fallas por Onda viajera," selinc.com, nd. [Online]. Available: <https://selinc.com/es/solutions/transmission/traveling-wave-fault-location/>
- [14] Henao et al., "Método de localización de fallas basado en impedancia aparente para sistemas de distribución con generación distribuida", pp. 6. 2015. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/dfd3f52e4c2ba35e7a34eed6a903249c7bef2e88>
- [15] Gómez et al., "Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución, utilizando medidores de calidad del servicio de energía eléctrica", 2012.
- [16] W. McKinney, Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and Jupyter. Cambridge: O'Reilly, 2022.
- [17] CYME International, Utilización de Python® en CYME . EATON, 2018.
- [18] CYME, "CYME – Library – Python (CYME 7.2)" [Online]. Available : [https://my.cyme.com/library/2a3fba93-9eee-7f3f-e65e-5642b05fc212\(v=cyme-7.2\)](https://my.cyme.com/library/2a3fba93-9eee-7f3f-e65e-5642b05fc212(v=cyme-7.2))
- [19] R. Ávila, "El SIG como herramienta de gestión en la empresa eléctrica Centrosur estado actual y futuro", 2012.

ORDEN DE EMPASTADO