

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 CON EL EMPLEO DEL
ALGORITMO DE GREEDY**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

PABLO ALEJANDRO CHÁVEZ PÉREZ

pablo.chavez@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

fabian.perez@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, PABLO ALEJANDRO CHÁVEZ PÉREZ 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.

PABLO ALEJANDRO CHÁVEZ PÉREZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por PABLO ALEJANDRO CHÁVEZ PÉREZ, 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 producto resultante 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.

PABLO ALEJANDRO CHÁVEZ PÉREZ

DR.- ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DEDICATORIA

A mis padres, Rolando y Magdalena, les dedico este logro que ha sido posible gracias a su inquebrantable amor, apoyo constante, perseverancia, lucha incansable y sabiduría en cada paso de este camino. En más de una ocasión, me sentí tentado a rendirme, pero gracias a ustedes, todo se ha transformado en una realidad tangible. Quiero que sepan que este logro no solo es mío, sino también de quienes han sido mi fuente inagotable de inspiración: ustedes.

A dos seres excepcionales que partieron a lo largo de este camino, dedico un recuerdo eterno. A mi querido abuelito Enrique (+), siempre lo llevaré en mi corazón como el hombre trabajador, cariñoso, bondadoso y chistoso que dejó una huella imborrable en mi vida. A mi tío Héctor (+), un hombre humilde, amoroso, bondadoso, respetuoso, trabajador y un gran pastor. Estoy seguro de que desde el más allá, están orgullosos de este logro y, de alguna manera, continúan velando por mí. Cuánto los extraño y cuánto los necesito.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi guía constante, por brindarme sabiduría, fortaleza y amor, elementos fundamentales que me han permitido alcanzar este título.

A mis queridos padres y a mi hermana, quienes nunca dudaron de mí, les expreso mi profundo agradecimiento por ser mi constante impulso y fuente de inspiración en la consecución de esta meta.

A mis tías Yovita y Raquelita, así como a mi abuelita Sara, quienes me acogieron como a un hijo a lo largo de este camino, les agradezco sinceramente por su apoyo incondicional, su amor y su comprensión constante. Gracias por estar siempre al pendiente de mí.

A mis Nitos, mi gratitud por su inquebrantable apoyo, su amor constante y por guiarme en este camino.

A toda mi familia, agradezco sus oraciones, su apoyo incondicional y sus ánimos constantes. Nunca dudaron de que alcanzaría esta meta, y eso ha significado el mundo para mí.

A la mujer que me ha brindado su apoyo incondicional, confianza y amor en cada paso de mi vida, mi Alito. Aprecio enormemente que en los momentos más difíciles no haya permitido que me rinda. Su constante respaldo ha sido una fuente inagotable de fuerza y motivación, y estoy infinitamente agradecido por tenerla a mi lado.

Agradezco al Dr. Fabián Pérez, mi tutor, por su paciencia, apoyo y conocimiento, que fueron fundamentales para culminar este trabajo de integración curricular.

Expreso mi profundo agradecimiento al Ing. Antonio Ortiz, quien desempeñó un papel fundamental como mi mano derecha en el desarrollo de este trabajo de integración curricular. Gracias por su orientación constante, por dedicarme su valioso tiempo, por su infinita paciencia, por compartir sus conocimientos y por las invaluable enseñanzas que me brindó. Más allá de ser un destacado tutor y profesional, se convirtió en un amigo, haciendo que este proceso no solo fuera académico, sino también lleno de risas.

Agradezco también a Sebas, quien compartió conmigo las alegrías y desafíos de este camino, y me enseñó el significado de un verdadero amigo.

A todas las personas que conocí a lo largo de estos años, ya sean amigos, compañeros de vida o aquellos que comparten conmigo la pasión por el fútbol, quiero expresar mi sincero agradecimiento. Los momentos que hemos compartido son inolvidables, y cada uno de ustedes ha dejado una huella especial en mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Contenido

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 Introducción	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	4
1.4.1. Localizador de falla.....	4
1.4.1.1. Funcionamiento de un localizador de falla	4
1.4.2. Algoritmo de Greedy	5
1.4.2.1. Elementos del algoritmo de Greedy.....	5
1.4.2.2. Esquema del algoritmo de Greedy	5
1.4.3. CYMDIST	6
1.4.4. Python	6
1.4.4.1. CYPY	6
1.4.4.2. Numpy	6
1.4.4.3. Pygad	6
1.4.4.4. Matplotlib.....	7
1.4.5. Algoritmos Genéticos	7
1.4.6. Sistemas Eléctricos de Distribución.....	8
1.4.7. Cortocircuitos en redes de distribución	9
1.4.7.1. Tipos de cortocircuitos	10
1.4.8. Flujo de potencia.....	10
2 METODOLOGÍA	12
2.1 Obtención de datos del sistema (ObtenerDatosSistema).....	14
2.2 Algoritmo de Greedy (AlgoritmoGreedy)	16
2.3 Observabilidad de los localizadores de falla (ObservabilidadLocalizadores).....	19

2.4	Algoritmo Genético (AlgoritmoGenetico)	21
2.5	Imprimir Resultados (ImprimirResultados)	23
2.6	Programa principal (main)	25
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
3.1	Resultados	26
3.2	Conclusiones.....	38
3.3	Recomendaciones.....	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS		
	Anexo I. Tablas de resultados - Red real de la EEASA	
	Anexo II. Manual de usuario	
	Anexo III. Código de la rutina computacional	

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular, titulado "Ubicación óptima de localizadores de falla en redes de distribución con el empleo del algoritmo de Greedy", fue estructurado en tres secciones fundamentales. Inicialmente, se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el propósito de adquirir una comprensión profunda de los conceptos básicos relacionados con el algoritmo de Greedy, los localizadores de falla, el software Cymdist y demás conceptos requeridos para el desarrollo de este trabajo.

Posteriormente, se abordó el desarrollo de la metodología, donde se formuló la función objetivo y se establecieron las restricciones necesarias para determinar la ubicación óptima de los localizadores de falla en sistemas eléctricos de distribución. Sobre la base de la metodología propuesta se creó una herramienta computacional que hace uso del lenguaje de programación Python y del software CYMDIST para llevar a cabo el respectivo análisis.

Finalmente, con la metodología propuesta y la herramienta desarrollada, se analizaron dos casos de estudio: una red de prueba y una red real correspondiente a un alimentador de una empresa distribuidora en Ecuador. Esta etapa permitió analizar los resultados obtenidos mediante la rutina computacional, verificando su funcionamiento y validez como herramienta de apoyo para este tipo de estudios.

PALABRAS CLAVE: algoritmo de Greedy, corriente de flujo, corriente umbral, cortocircuito, localizador de falla.

ABSTRACT

This Curricular Integration Work, entitled "Optimal location of fault locators in distribution networks using Greedy's algorithm", was structured in three main sections. Initially, a bibliographic review was carried out with the purpose of acquiring a deep understanding of the basic concepts related to Greedy's algorithm, fault locators, Cymdist software and other concepts required for the development of this work.

Subsequently, the development of the methodology was addressed, where the objective function was formulated, and the necessary restrictions were established to determine the optimal location of fault locators in electrical distribution systems. Based on the proposed methodology, a computational tool was created using Python programming language and CYMDIST software to carry out the respective analysis.

Finally, using the proposed methodology and the developed tool, two case studies were analyzed: a test network and a real network corresponding to a feeder of a distribution company in Ecuador. This stage allowed analyzing the results obtained by means of the computational routine, verifying its operation and validity as a support tool for this type of studies.

KEYWORDS: fault locator, flow current, Greedy algorithm, short circuit, threshold current.

1 INTRODUCCIÓN

En las redes eléctricas de distribución o redes de subtransmisión, suelen surgir desafíos asociados con la pronta detección de fallas eléctricas por parte del personal encargado de operar dichas redes. Esta tarea se vuelve aún más crucial para el equipo de campo, que es el responsable de la identificación y corrección de posibles anomalías en la red, así como de resolver cualquier incidencia que se presente.

Por lo tanto, este inconveniente podría ocasionar la indisponibilidad prolongada de aquellos elementos o secciones de la red en las que se originó la falla eléctrica. Esto a su vez, provoca altos niveles de energía no suministrada, tiempos largos de restauración del servicio eléctrico, en consecuencia, causa malestar al usuario final.

Con el objetivo de hacer frente a la problemática señalada, se han desarrollado soluciones tecnológicas como los denominados “localizadores de falla” que actualmente se comercializan y que son de interés de las diferentes empresas eléctricas que brindan el servicio de distribución de energía. Sin embargo, el empleo de estos dispositivos conlleva la necesidad de realizar otros análisis, como, por ejemplo, su ubicación dentro de la red eléctrica.

Por otro lado, CYMDIST es un software diseñado para modelar y simular sistemas eléctricos, encontrando su aplicación para el presente trabajo en redes de distribución. Una de las características destacadas de este software es su componente denominado Python, el cual se fundamenta en un lenguaje de programación. En este contexto, se pretende aprovechar dicho componente para desarrollar un código computacional que aborde la problemática mencionada anteriormente, específicamente relacionada con la ubicación óptima de los localizadores de falla.

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo principal la aplicación del algoritmo de Greedy en una herramienta computacional desarrollada en el lenguaje de programación Python, la cual interactúa con el software CYMDIST. La herramienta determinará la ubicación óptima de los localizadores de falla de una red de distribución. El algoritmo de Greedy se caracteriza por ser robusto y sigue un método heurístico que consiste en seleccionar la opción apropiada en cada paso local, con el objetivo de alcanzar una solución general óptima. Este enfoque algorítmico se reconoce por su sencillez en el diseño y verificación de su funcionamiento, usado en problemas de optimización.

Para la realización del presente trabajo y el cumplimiento de los objetivos y alcance planteados, en primera instancia se llevó a cabo una revisión de fuentes bibliográficas pertinentes, como se detalla en el Capítulo I. Luego, como se evidencia en el Capítulo II, se procedió a establecer una metodología para afrontar la problemática identificada en relación a la ubicación óptima de localizadores de falla, empleando el algoritmo de Greedy, e implementando una herramienta computacional en el lenguaje de programación Python. Finalmente, en el Capítulo III de este documento, se presentan los resultados de aplicar la metodología propuesta a dos casos de estudio, así como las conclusiones y recomendaciones derivadas de este Trabajo de Integración Curricular.

1.1 Objetivo general

Desarrollar una herramienta computacional en el lenguaje de programación Python, empleando el algoritmo de Greedy, para establecer la ubicación óptima de localizadores de falla en redes eléctricas de distribución.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar fuentes bibliográficas sobre la teoría del algoritmo de Greedy, el principio de funcionamiento de localizadores de falla, uso del software Cymdist y programación en Python, para definir la función objetivo y las restricciones correspondientes.
- Estructurar una herramienta computacional utilizando el algoritmo de Greedy en el lenguaje Python, incluyendo la función objetivo y las restricciones planteadas.
- Emplear la rutina computacional desarrollada sobre una red eléctrica de prueba IEEE, con el fin de realizar un análisis de la ubicación óptima de los localizadores de falla y, de ser el caso, realizar ajustes al código estructurado.
- Determinar, mediante aplicación de la herramienta computacional desarrollada, la ubicación óptima de los localizadores de falla en una red de una empresa eléctrica de distribución del Ecuador.

1.3 Alcance

Este componente iniciará con una revisión bibliográfica abarcando los fundamentos del algoritmo de Greedy, el funcionamiento de los localizadores de falla, la operación del software Cymdist y la programación en el lenguaje Python. Posteriormente, se procederá

a definir la función objetivo y sus posibles restricciones para la determinación de la ubicación óptima de localizadores de falla en una red eléctrica de distribución.

Se estructurará una herramienta computacional en Python, que incluirá el algoritmo de Greedy, así como la función objetivo y sus posibles restricciones planteadas, para emplearla inicialmente en una red eléctrica estándar IEEE de prueba, donde se llevará a cabo un análisis de la ubicación óptima de los localizadores de falla, verificando el funcionamiento de la herramienta computacional y, de ser el caso, se realizarán afinaciones a la misma.

Finalmente, se determinará la ubicación óptima de los localizadores de falla de una red de una empresa eléctrica de distribución del Ecuador, empleando el código computacional desarrollado.

Este componente se basa en la ejecución de las actividades mencionadas a continuación:

A. Fase de Planteamiento Teórico y de diseño:

Se llevará a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica que abarcará los fundamentos del algoritmo de Greedy, el funcionamiento de los localizadores de falla, la operatividad del software Cymdist y la programación en Python. A partir de esta revisión, se recopilará información suficiente para definir la función objetivo y las restricciones pertinentes. Con estos elementos en consideración, se procederá al desarrollo de una herramienta computacional que permitirá identificar la ubicación óptima de los localizadores de falla en redes eléctricas de distribución.

B. Fase de definición de red de prueba:

Se va a utilizar una red de prueba estándar IEEE, en donde se determinará la ubicación óptima de los localizadores de falla. Por otro lado, se seleccionará una red perteneciente a una empresa eléctrica de distribución en Ecuador y se realizará un proceso similar para encontrar la ubicación más adecuada de los localizadores de falla en esta red específica.

C. Fase de evaluación:

Se procederá a verificar la funcionalidad de la herramienta computacional desarrollada con lenguaje Python, la cual hará uso del algoritmo de Greedy. Se llevará a cabo una evaluación de los resultados obtenidos tanto en la red de prueba estándar IEEE como en la red correspondiente a la empresa eléctrica de distribución en Ecuador.

D. Fase de Análisis de resultados y elaboración del documento:

Se procederá a analizar los resultados proporcionados por la herramienta computacional, lo que permitirá establecer las conclusiones más relevantes del trabajo desarrollado, así como la identificación de posibles recomendaciones. Finalmente se elaborará el documento escrito del trabajo donde se incluirá toda la información correspondiente.

1.4 Marco teórico

1.4.1. Localizador de falla

Es un dispositivo que se instala en líneas eléctricas, que comúnmente se implementa en los alimentadores primarios, con niveles de medio voltaje. Su función principal es enviar una señal mediante telecomunicación, o brindar una indicación visual mediante el encendido de una luminaria o mediante una alarma, indicando la presencia de una falla eléctrica y estimando la ubicación de la misma [1].

Los localizadores de falla en los sistemas eléctricos son esenciales bajo la consideración de los siguientes aspectos:

- Reducción del Tiempo de Indisponibilidad: Reducir el tiempo que el sistema está fuera de servicio.
- Mejora de la Confiabilidad del Sistema: Aumentar la confiabilidad y disponibilidad del sistema eléctrico [1].

1.4.1.1. Funcionamiento de un localizador de falla

El principio de funcionamiento de un localizador de falla, se basa en el análisis de las corrientes que el dispositivo sensa y la comparación de éstas con una corriente umbral (corriente de referencia). Al ocurrir una falla eléctrica en la red, se presenta la circulación de corrientes con valores elevados, las cuales atraviesan el dispositivo de localización activándolo, para indicar que ocurrió una falla.

Ahora bien, el dispositivo se activa al momento que la corriente de falla es mayor a la corriente umbral. La corriente umbral es un valor de corriente que se establece como parámetro en el localizador de falla. Comúnmente la corriente umbral se la define al 120% de la corriente máxima del flujo de potencia. Adicional, los localizadores de falla cuentan con intercomunicación entre sí; y por otro lado, para conectarse a un sistema SCADA

requieren de un sistema de comunicaciones como fibra óptica, radio frecuencia, entre otras [2].

1.4.2. Algoritmo de Greedy

Es un algoritmo “voraz” que se usa principalmente para resolver problemas de optimización en varios ámbitos de las ciencias exactas, donde la solución es un conjunto de valores que satisfacen las restricciones correspondientes y que el valor de la función objetivo sea el óptimo [3].

1.4.2.1. Elementos del algoritmo de Greedy

Para resolver un problema usando el algoritmo de Greedy, se deben considerar los siguientes elementos:

- **Conjunto de candidatos:** Elementos que van a ser seleccionados.
- **Solución parcial:** Candidatos que van a ser seleccionados.
- **Función de selección:** Determina el mejor candidato del conjunto de candidatos seleccionados.
- **Función de factibilidad:** Determina si es posible completar la solución parcial para alcanzar una solución del problema.
- **Criterio:** Indica si la solución parcial obtenida resuelve el problema.
- **Función objetivo:** Es la que se debe maximizar o minimizar. Posteriormente, brinda el valor de la solución alcanzada [4].

1.4.2.2. Esquema del algoritmo de Greedy

El esquema de funcionamiento del algoritmo Greedy es presentado a través de los cuatro pasos mencionados a continuación:

1. Se parte de un conjunto vacío.
2. De la lista de candidatos, se escoge el mejor de acuerdo con la función de selección.
3. Se comprueba si se puede llegar a una solución con el candidato seleccionado, si esto no es factible, se elimina de la lista de candidatos posibles y no se lo vuelve a considerar.
4. El proceso mencionado anteriormente, se repite hasta llegar a una solución óptima o hasta que no exista posibles candidatos [4].

1.4.3. CYMDIST

Es un software de simulación que se usa para el análisis de redes eléctricas, especializado en redes eléctricas de distribución. Este programa fue diseñado para brindar ayuda en la planificación y simulación del comportamiento de redes eléctricas de distribución.

CYMDIST permite modelar cualquier red de distribución, crear redes equilibradas o desequilibradas, redes secundarias, de configuración radial o malladas, monofásicas, bifásicas o trifásicas, donde se las puede representar de manera esquemática o geográfica. Adicional, los equipos modelados en este software están normalizados con respecto a la industria con el fin de tener una red más realista [5].

El programa tiene varias funciones, entre las principales se puede mencionar: flujo de potencia, análisis de fallas, balance de cargas, distribución y evaluación de cargas, entre otras.

Es importante mencionar que CYMDIST cuenta con una consola y editor de Python, mediante el paquete CymPy se aprovecha las ventajas del lenguaje de programación Python para generar códigos que viabilizan la interconexión de estas dos herramientas.

1.4.4. Python

Es un lenguaje de programación muy eficiente, que contiene una gran biblioteca estándar de códigos desarrollados para brindar solución a varios problemas. Por otro lado, el lenguaje Python es apto para todas las plataformas y de igual forma tiene conectividad con la mayoría de los programas [6].

A continuación, se mencionan los paquetes o bibliotecas de Python que se emplearon en el presente trabajo.

1.4.4.1. CYMPY

CymPy es un paquete que proporciona formas útiles de realizar análisis, acceder a propiedades de red, manipular dispositivos, equipos, secciones, entre otras. Adicionalmente, desarrolla análisis eléctricos, conversión de datos, gestión de datos y automatización empleando el lenguaje Python [7].

1.4.4.2. Numpy

Es una biblioteca que permite usar vectores y matrices para ejecutar operaciones matemáticas o algebraicas.

1.4.4.3. Pygad

Es una biblioteca que brinda soporte para la creación de algoritmos genéticos y optimizar de una forma sencilla, permite diferentes tipos de operadores de cruce, mutaciones y selección de padres.

1.4.4.4. Matplotlib

Biblioteca que permite crear y personalizar los diferentes tipos de gráficos, entre ellos: diagrama de barras, histogramas, diagramas de dispersión, diagrama de líneas, etc. [6].

1.4.5. Algoritmos Genéticos

Un algoritmo genético (AG) constituye una estrategia de optimización y búsqueda que se inspira en los procesos evolutivos naturales. Se fundamenta en los principios de la selección natural y la genética, siendo empleado para hallar soluciones aproximadas u óptimas a problemas de optimización y búsqueda.

El AG contiene diferentes variables que se definen a continuación:

Población: En un algoritmo genético, se opera con una población conformada por posibles soluciones al problema. Cada individuo en dicha población representa una solución potencial.

Cromosomas e individuos: Cada integrante de la población posee un conjunto de parámetros o características que lo identifican, denominados cromosomas. Estos cromosomas suelen representarse como cadenas de bits.

Función de aptitud: Se establece una función de aptitud que evalúa la calidad de cada solución en relación con el problema. Esta función asigna un valor numérico a cada individuo de la población.

Selección: Los individuos en la población son seleccionados para la reproducción según su aptitud. Aquellos con una aptitud más elevada tienen mayores posibilidades de ser elegidos, emulando así el proceso de selección natural.

Cruce (crossover): Se combinan los cromosomas de dos individuos seleccionados para generar nuevos individuos (descendencia). Este proceso simula la recombinación genética.

Mutación: Ocasionalmente, algunos bits en el cromosoma de un individuo pueden cambiar de manera aleatoria, introduciendo variabilidad en la población y emulando la mutación genética.

Reemplazo: Los nuevos individuos (descendencia) sustituyen a algunos de los individuos existentes en la población, generalmente mediante algún criterio de selección.

Criterio de parada: Se establece un criterio para determinar cuándo detener el algoritmo, ya sea al alcanzar un número máximo de generaciones o cuando la aptitud de la mejor solución alcanza un umbral predefinido.

El objetivo del algoritmo genético es evolucionar a lo largo de generaciones, de modo que la población tienda a contener soluciones cada vez más efectivas para el problema en cuestión [8].

1.4.6. Sistemas Eléctricos de Distribución

Los sistemas eléctricos de distribución (SED) desempeñan un papel crucial al conectar los sistemas de transmisión con el consumidor final. Su función principal consiste en suministrar energía eléctrica de manera instantánea, manteniendo niveles de voltaje y frecuencia adecuados y aceptables para el consumo [9].

La clasificación de los sistemas de distribución se realiza en función de las características de la carga que gestionan, el volumen de energía que transportan y los niveles de confiabilidad que deben mantener [10].

- **Sistema de distribución urbano:** Alimenta de energía eléctrica a grandes sectores urbanos con gran demanda de consumo donde la densidad de carga es pequeña, es decir, suministra de energía a muchos clientes que tienen consumos pequeños, sin embargo, se requiere una adecuada utilización de los equipos y un correcto dimensionamiento de estos.
- **Sistema de distribución rural:** Abastece de energía eléctrica a cargas o clientes ubicados en zonas distantes. Generalmente, estos lugares no presentan una alta densidad de carga, pero la distribución de energía requiere la utilización de numerosos elementos eléctricos debido a las distancias involucradas. Estos proyectos demandan una significativa inversión de capital.

Los SED se dividen en tres componentes principales:

- **Subestaciones de distribución.**

Son responsables de recibir la potencia proveniente de los sistemas de subtransmisión, generalmente operan con voltajes que oscilan entre 66 kV y 230 kV. Su función principal radica en reducir estos voltajes a niveles admisibles para su transporte a través de los alimentadores primarios. Además, pueden estar designadas para seccionar hacia otros sistemas de distribución primaria o clientes que necesiten el suministro eléctrico a niveles de voltajes primarios [11].

- **Alimentadores primarios.**

Forman parte del sistema de distribución primaria, los alimentadores transportan el suministro eléctrico desde las subestaciones de distribución hasta los transformadores de distribución. Generalmente, se despliegan mediante postes de hormigón armado en alimentadores aéreos o a través de ductos en alimentadores subterráneos.

Los alimentadores primarios pueden ser clasificados según su configuración [12]:

Red radial: Este tipo de red es el más simple, aunque con una confiabilidad limitada. En caso de una falla en la cabecera, la ausencia de suministro eléctrico afectaría a todos los usuarios conectados a este alimentador. A pesar de su menor confiabilidad, resulta económica. Se denomina radial porque se extiende desde una subestación de distribución hasta las cargas sin cerrar el circuito con otra subestación. Generalmente, se utiliza para proveer energía a usuarios en áreas alejadas.

Red en anillo: Se trata de una red más compleja que garantiza mayor calidad y confiabilidad, asegurando principalmente la continuidad del servicio eléctrico. En esta configuración, varias subestaciones de distribución se interconectan, mejorando la confiabilidad del sistema. En caso de contingencia en una línea, ésta puede salir de servicio, pero la red continúa suministrando energía por otra línea proveniente de otra subestación. La interconexión de las subestaciones forma un anillo, siendo comúnmente utilizada en zonas urbanas.

Red Mallada: Este tipo de red es más confiable y se compone de redes tipo radial y en anillo. Este tipo de sistemas se implementan cuando la demanda en una zona crece y los sistemas de tipo radial y anillo no están diseñados para soportar esta densidad de carga. En esencia, son mejoras realizadas a estos sistemas, lo que implica una mayor complejidad en la maniobra y control [12].

- **Alimentadores secundarios**

Se encargan de establecer la conexión desde un transformador de distribución, ya sea trifásico o monofásico, hasta las acometidas. Operan a niveles de voltaje denominados de “*baja tensión*”, cuyos valores son esenciales para el consumo de los clientes. En muchos casos, la red de distribución secundaria adopta una configuración radial [12].

1.4.7. Cortocircuitos en redes de distribución

Los cortocircuitos se definen como corrientes que circulan en un circuito o sistema eléctrico debido al contacto entre dos o más líneas sometidas a diferentes potenciales. Este

fenómeno se manifiesta en cortocircuitos tanto trifásicos como monofásicos, donde se produce un choque entre una fase y la tierra, generalmente causado por la pérdida de aislamiento entre los conductores [13].

Los cortocircuitos en las redes de distribución eléctrica no solo generan pérdidas de energía, sino que también impactan negativamente en la demanda energética y reducen significativamente los estándares de calidad [13].

1.4.7.1. Tipos de cortocircuitos

- **Cortocircuito trifásico**

Este tipo de falla ocurre cuando las tres líneas del sistema trifásico se ponen en contacto. Se destaca por su comportamiento equilibrado, ya que todas las fases se ven afectadas de manera uniforme.

- **Cortocircuito bifásico**

Esta falla eléctrica surge cuando hay contacto o choque entre dos fases. Aunque son menos frecuentes que los cortocircuitos trifásicos, pueden causar daños mayores debido a la falta de una vía de descarga para la corriente de cortocircuito, provocando daños mayores a equipos.

- **Cortocircuito bifásico a tierra**

Similar al cortocircuito bifásico, este tipo de falla se produce por la conexión de dos conductores a tierra, y la corriente de cortocircuito se descarga a través del contacto a tierra.

- **Cortocircuito monofásico a tierra**

Es la falla más común, representando hasta el 80% de los casos de cortocircuitos. Se produce cuando una fase entra en contacto con la tierra [13].

1.4.8. Flujo de potencia

El flujo de potencia en el contexto de los sistemas eléctricos se refiere a la distribución de potencia activa y reactiva a través de las líneas y nodos de una red eléctrica. Es un análisis fundamental que evalúa y calcula cómo fluye la energía eléctrica a través de un sistema, determinando los valores de voltaje y corriente en cada componente.

En esencia, el flujo de potencia busca resolver el balance de potencia en un sistema eléctrico, asegurando que la cantidad de potencia que entra en un nodo sea igual a la que

sale. Este proceso es vital para garantizar la operación eficiente y segura de las redes eléctricas, especialmente en entornos de carga variable y condiciones cambiantes.

El análisis de flujo de potencia implica el uso de modelos matemáticos y ecuaciones que describen las características de los componentes del sistema, como líneas de transmisión, transformadores y generadores. A través de métodos numéricos, se determinan los valores de voltaje y corriente en cada punto de la red, considerando las restricciones y características específicas de los elementos involucrados.

Las aplicaciones del flujo de potencia son diversas e incluyen la planificación de la expansión de la red eléctrica, la evaluación de la capacidad de carga de las líneas, la identificación de posibles congestiones, y la optimización de la operación para mejorar la eficiencia y confiabilidad del suministro eléctrico [14].

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología empleada para cumplir con el Trabajo de Integración Curricular, donde se utilizó el programa CYMDIST y el lenguaje de programación Python con diferentes bibliotecas que fueron mencionadas en el capítulo anterior, para implementar el algoritmo de Greedy y obtener la ubicación óptima de localizadores de falla en redes de distribución eléctrica.

La Figura 2.1 muestra el diagrama general de la metodología que incluye la rutina computacional desarrollada.

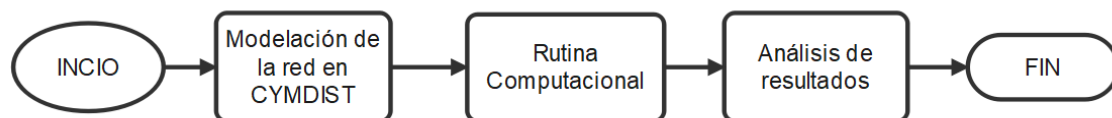


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología.

La primera etapa consiste en la modelación de la red eléctrica de distribución en CYMDIST. Si bien, la metodología empleada en este trabajo es aplicada sobre dos casos de estudio, una red de prueba y un alimentador real, ésta es de carácter general pudiendo ser empleada sobre otras redes de distribución que sean modeladas en CYMDIST.

Para la red de prueba, se exportó y se seleccionó una parte de la red estándar IEEE de 33 nodos, mientras que, para la red real de una empresa distribuidora del Ecuador, se extrajo una base de datos de equipos y redes. Posteriormente, se seleccionó un alimentador y se exportó la red del alimentador modelado.

Para la etapa de la rutina computacional, se elaboraron diferentes scripts para solucionar el problema de optimización planteado y cumplir con las diferentes restricciones y función objetivo.

Finalmente, en la última etapa de la metodología se analizan los resultados arrojados por la rutina computacional, verificándose su adecuado funcionamiento, así como la obtención de soluciones correctas.

Es importante destacar que la parte más laboriosa y fundamental de la metodología ha sido la etapa de la rutina computacional, la cual se detalla a continuación.

En la Figura 2.2 se presenta el diagrama de flujo de la rutina computacional.

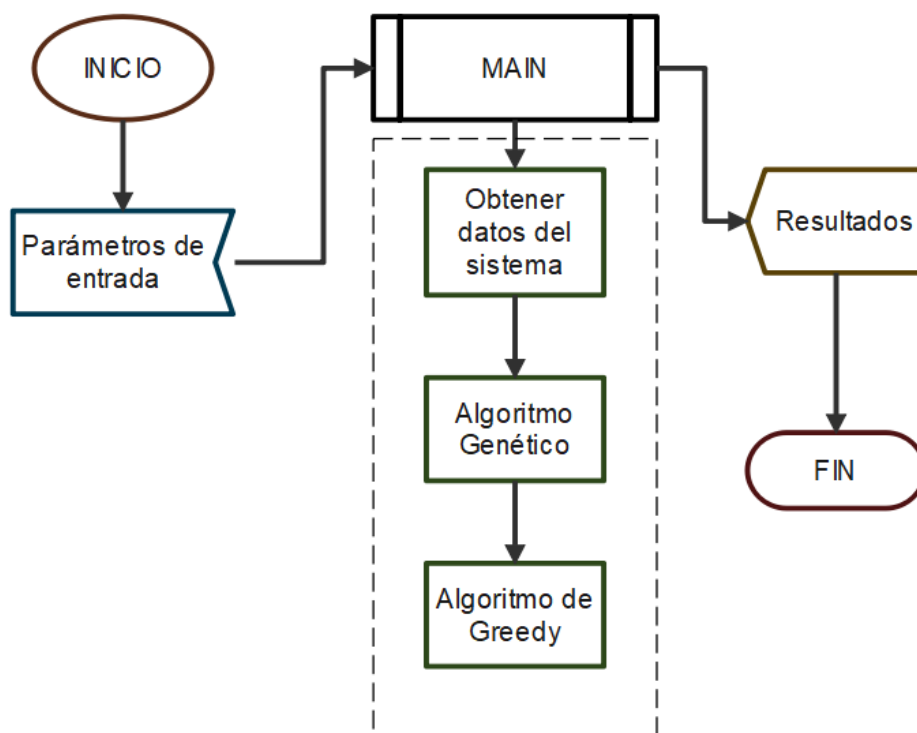


Figura 2.2. Diagrama de flujo de la rutina computacional.

La rutina computacional se estructura de la siguiente forma:

- La función "ObtenerDatosSistema" desempeña un papel fundamental al adquirir los datos sobre las líneas y nodos, así como las corrientes de carga en todas las líneas y las corrientes mínimas de cortocircuito.
- La función "AlgoritmoGreedy" adquiere una importancia significativa, ya que en su implementación se encuentra el algoritmo de Greedy, el cual proporciona la ubicación óptima de los localizadores de falla en la red bajo análisis.
- La función "ObservabilidadLocalizadores" determina el rango de visibilidad del localizador de falla aguas abajo, garantizando así una cobertura integral en toda la red. Aunque no se incluye en detalle en el diagrama de flujo de la Figura 2.2, es esencial destacar que esta función desempeña un papel importante dentro del "Algoritmo de Greedy".
- La función "AlgoritmoGenetico" obtiene el valor de corriente umbral y la distancia óptima (ver ecuación 2.2.) de los localizadores de falla.

- La función “ImprimirResultados” se encarga de mostrar los resultados obtenidos por la rutina computacional y, al mismo tiempo, genera archivos que facilitarán la interpretación de dichos resultados.
- El núcleo central del programa, denominado "main", es la parte principal desde la cual se inicia la ejecución del código.

2.1 Obtención de datos del sistema (ObtenerDatosSistema)

En esta función se obtienen los datos como corrientes de flujo de potencia, corrientes de cortocircuito y la longitud de todas las líneas del sistema.

La Figura 2.3 muestra el diagrama de flujo de esta función.

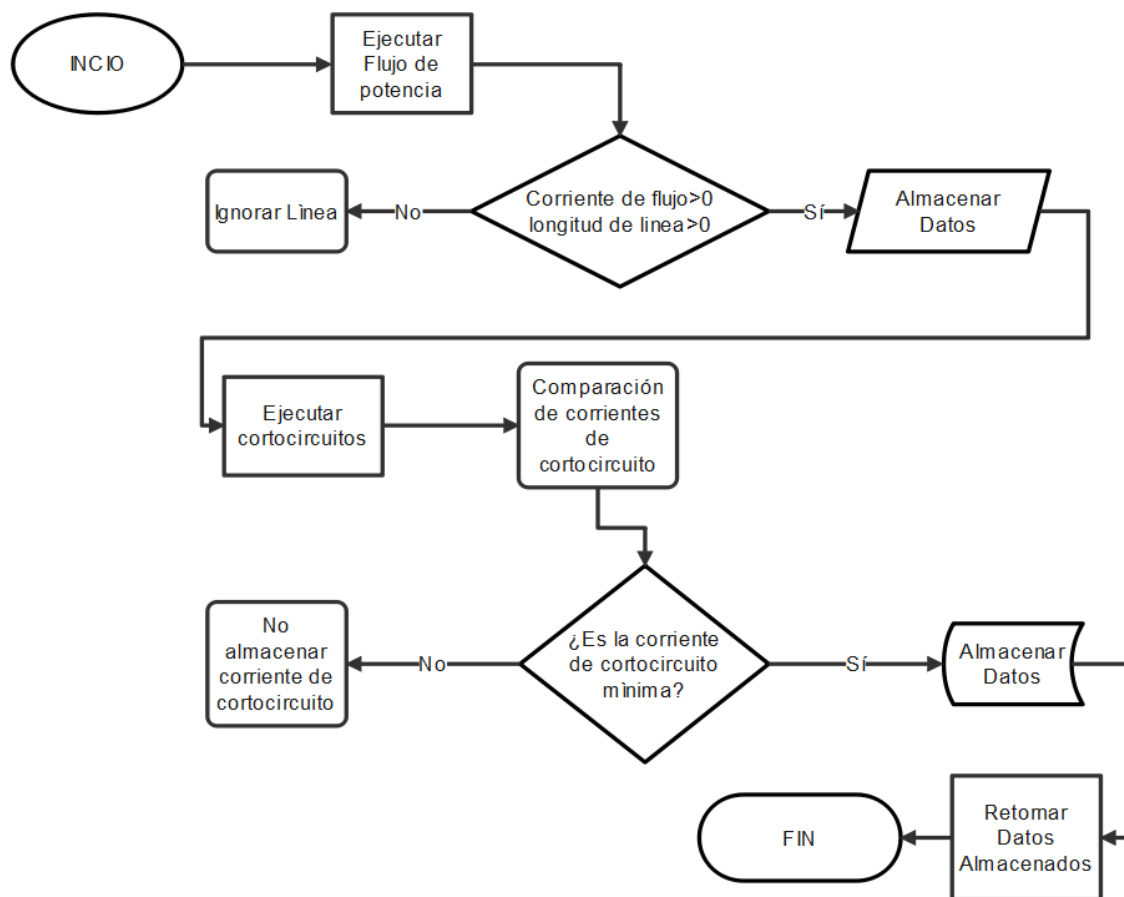


Figura 2.3. Diagrama de flujo de la función “Obtención de datos del sistema”.

Se va a describir paso por paso el funcionamiento de esta función:

1. Se inicializan todas las variables a considerar y se obtienen los datos de todas las líneas áreas, líneas áreas desbalanceadas y líneas áreas por fase.

2. Se ejecuta un flujo de potencia en la red eléctrica que se está analizando, para almacenar los valores iniciales de la red.
3. Se implementa un lazo "for" con el propósito de recorrer exhaustivamente todas las líneas de la red eléctrica, con el objetivo de extraer información clave como el nodo de origen, nodo de llegada, corriente de flujo de potencia y longitud del tramo. En el contexto de este lazo, se incorpora una estructura condicional que debe satisfacer las siguientes condiciones:
 - La corriente de flujo de potencia debe ser mayor a cero, de lo contrario se descarta dicho elemento.
 - La longitud de la línea debe ser mayor a cero de lo contrario se la descarta.
 - La línea debe tener fases A, B y C, para simular todos los tipos de cortocircuitos.
4. Se ejecutan los siguientes tipos de cortocircuitos en todas las líneas almacenadas:
 - Falla Línea-Tierra (LG).
 - Falla Línea-Línea (LL).
 - Falla Línea-Línea-Tierra (LLG).
 - Falla Línea-Línea-Línea (LLL).
 - Falla Línea-Línea-Línea-Tierra (LLLG).

La ejecución de los cortocircuitos se la realiza en base a ciertos parámetros de entrada (establecidos a criterio del usuario), los cuales son:

- Posición de falla: A qué porcentaje de la línea se va a simular la falla.
- Resistencia de falla: Valor de la resistencia de falla.
- Reactancia de falla: Valor de la reactancia de falla

Es importante mencionar que, con la rutina desarrollada en Python se ejecutan en CYMDIST los cortocircuitos mencionados con todas las combinaciones posibles de fallas entre fases, para cada línea de la red eléctrica.

5. Con los valores obtenidos de todas las corrientes de falla de cada línea, se selecciona la corriente mínima de cortocircuito, para determinar el rango de los

valores de la corriente umbral, entre el flujo de potencia y la corriente mínima de cortocircuito.

6. Finalmente, se almacena y se retorna las siguientes variables de cada línea:

- Nombre de la línea.
- Nodo de origen.
- Nodo de llegada.
- Nodos en forma de lista.
- Corriente de flujo de potencia.
- Corriente de cortocircuito mínima.
- Longitud de la línea.

2.2 Algoritmo de Greedy (AlgoritmoGreedy)

Se empleó el algoritmo de Greedy para encontrar la ubicación óptima de los localizadores de fallas en una red de distribución. Este algoritmo fue adaptado con este propósito de análisis eléctrico, en el lenguaje de programación Python.

Para la implementación del algoritmo se define la función objetivo que se muestra a continuación:

$$\min Z = \sum \# \text{ de localizadores} \quad (2.1)$$

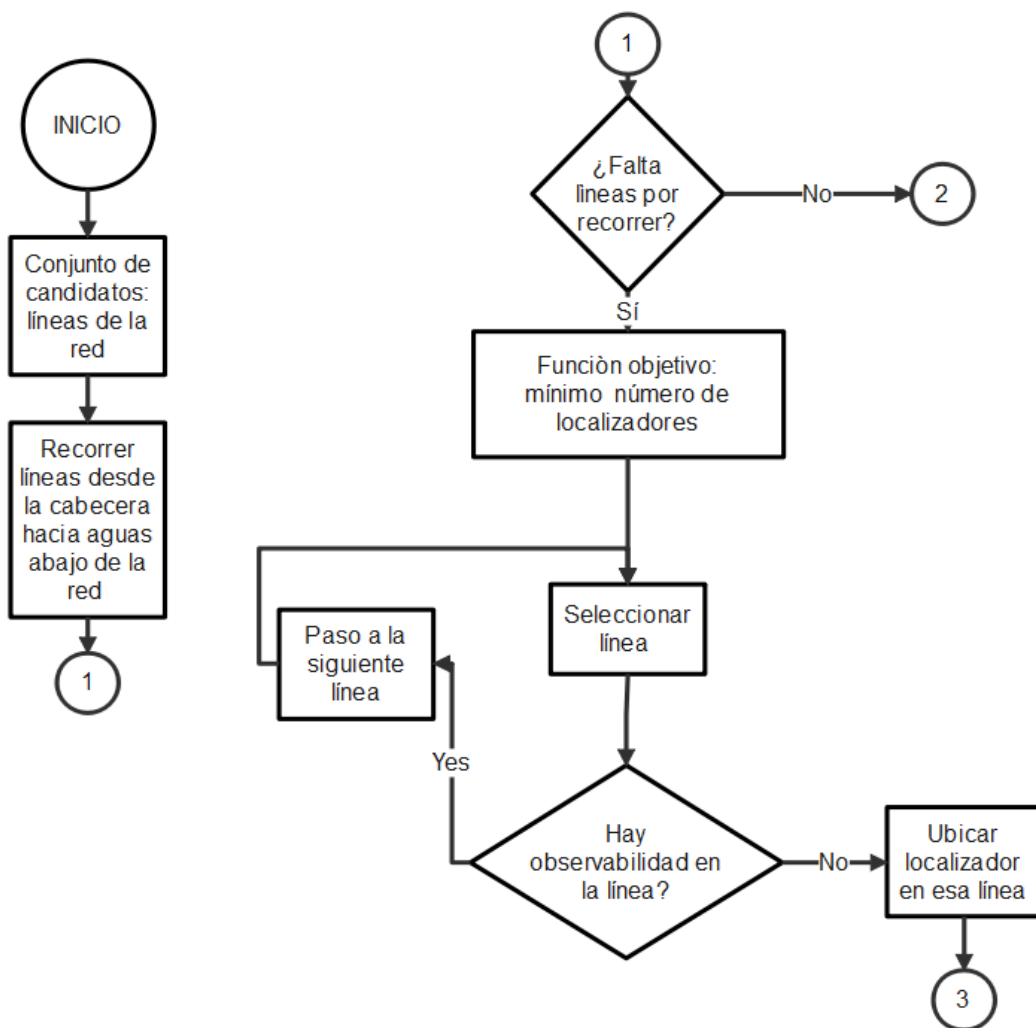
La función objetivo se basa en minimizar el número de localizadores de falla, lo que a su vez viabiliza encontrar su ubicación óptima en la red eléctrica, todo esto vinculado con la determinación del valor adecuado de corriente umbral, el cual es encontrado a través del algoritmo genético empleado (descrito en las siguientes secciones). Por otro lado, se tienen ciertas *restricciones* que se deben cumplir, las cuales se mencionan a continuación:

- Distancia máxima entre localizadores de falla es de 10 kilómetros por la interconectividad entre sí [15].
- La corriente umbral debe ser mayor a la corriente del flujo de potencia y menor a la corriente mínima de cortocircuito. Con esta restricción se asegura tener un alcance (observabilidad) completo de la red de distribución.
- Comparación de visualización de los localizadores. Se evalúan las distancias óptimas para la ubicación de localizadores de falla, con el fin de obtener una

precisión adecuada el momento de la ubicación de una falla. Asociado a un caso práctico, la precisión se refiere a la limitación de los tramos que los grupos de campo deben recorrer en caso de una falla, lo que contribuye a una ubicación más exacta y eficiente.

Es importante mencionar que, a mayor distancia entre localizadores de falla, menor es el número requerido de estos dispositivos. Por otro lado, si se tiene mayor número de localizadores se obtiene mejor precisión (ubicación de la falla) en la red eléctrica.

La Figura 2.4 presenta el diagrama de flujo del Algoritmo de Greedy.



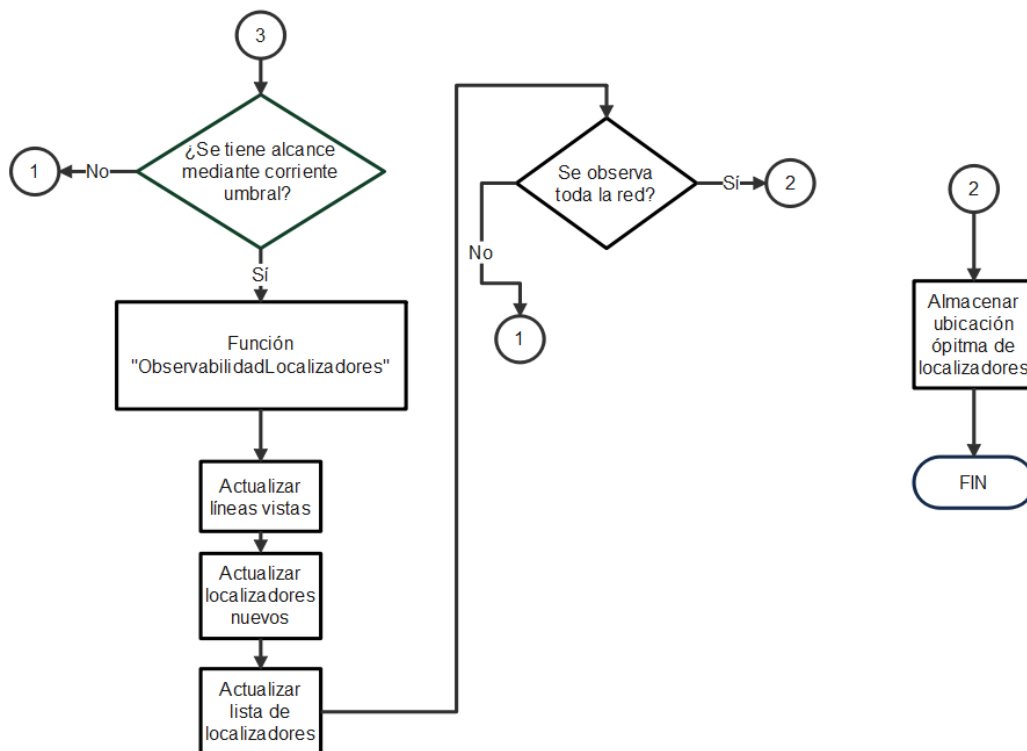


Figura 2.4. Diagrama de flujo del Algoritmo de Greedy.

Una vez que se planteó la formulación matemática base, se describe a continuación el funcionamiento del algoritmo de Greedy:

1. Se inicializan las variables correspondientes, seguido de la lectura de los valores de entrada, lo que permite la ejecución correcta del algoritmo. Como valores de entrada se tiene:
 - Nombre de la línea.
 - Nodo de origen.
 - Nodo de llegada.
 - Lista de nodos.
 - Corriente flujo de potencia.
 - Corriente mínima de cortocircuito.
 - Corriente umbral óptima.
 - Longitud de la línea.
 - Distancia óptima.

2. Se recorre todas las líneas mediante un lazo “for” empezando por el nodo más cercano al equivalente de red.
3. Se ubican localizadores de falla en la línea donde no exista observabilidad. Se compara con los nodos aguas arriba y nodos aguas abajo de la línea iterada. El localizador nuevo se agrega a la lista “localizadores_nuevos”.
4. Si la línea tiene observabilidad, se actualiza la lista de nodos aguas abajo y no se agrega el localizador de falla.
5. Se llama a la función “ObservabilidadLocalizadores” dentro del lazo mencionado, donde se retornan las líneas vistas por los localizadores de falla.
6. Se actualiza la lista de las líneas y se borran las líneas vistas (analizadas y observables).
7. Se agrega a la lista “localizadores” la línea donde se ubicó el localizador de falla.
8. El procedimiento se repite hasta que no se tengan líneas que iterar y se cumpla el alcance de visualización completo de la red.
9. Retornar la solución de la ubicación óptima de los localizadores de falla.

2.3 Observabilidad de los localizadores de falla (ObservabilidadLocalizadores)

Esta función compara la corriente de flujo, la corriente mínima de falla y las distancias óptimas, para identificar la distancia y líneas observadas por el localizador colocado en determinada posición mientras el algoritmo se va ejecutando.

La Figura 2.5 muestra el diagrama de flujo de la función de observabilidad.

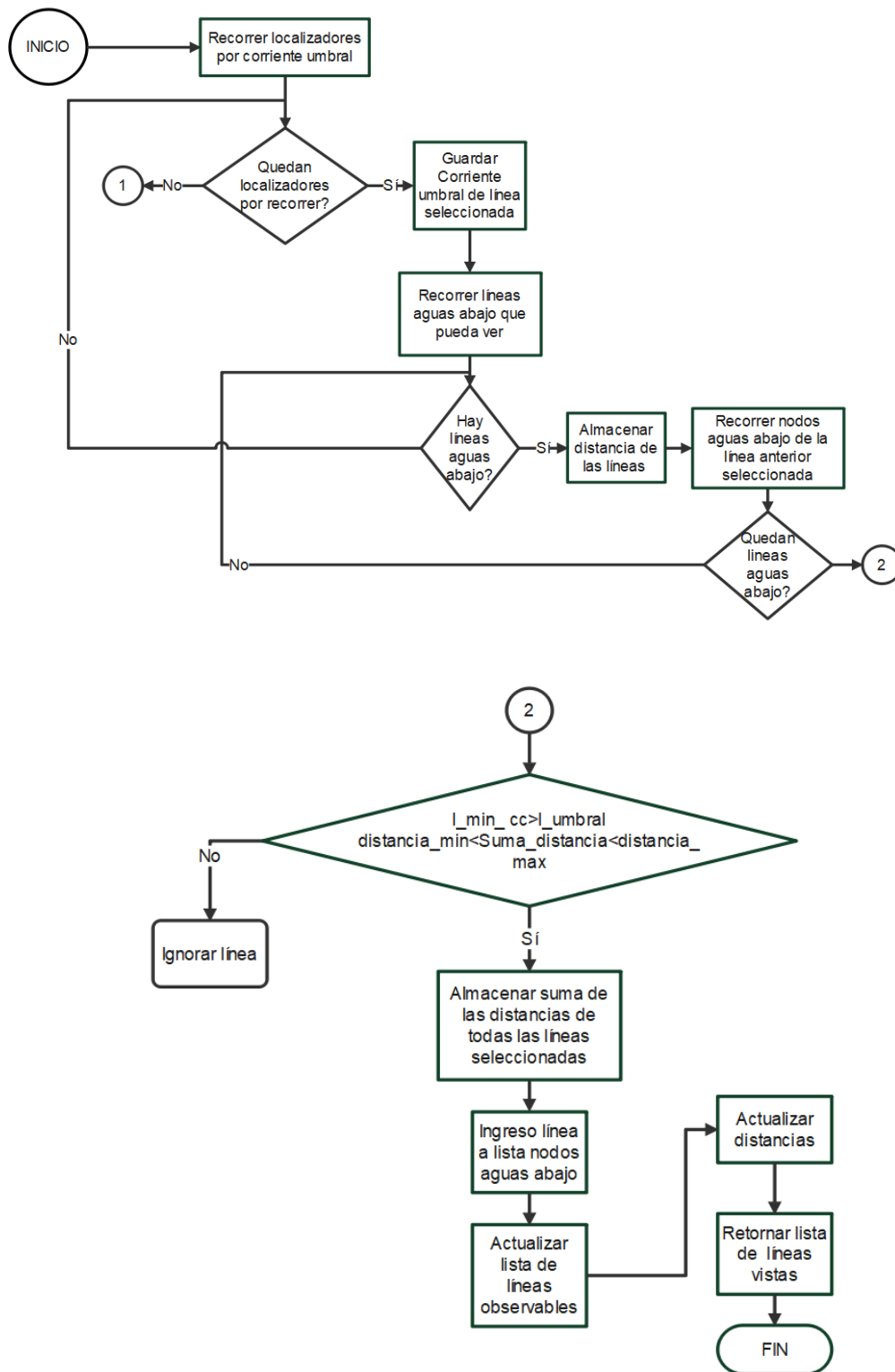


Figura 2.5. Diagrama de flujo de la función observabilidad de los localizadores.

A continuación, se detalla el procedimiento de la función:

1. Se inicializan las variables respectivas y leen los siguientes datos de entrada para ejecutar la función:

- Lista localizadores nuevos.
 - Nodos aguas arriba.
 - Nodos aguas abajo.
 - Corriente de flujo de potencia.
 - Corriente mínima de cortocircuito.
 - Corriente umbral óptima.
 - Longitud de la línea.
 - Distancia óptima.
2. Dentro del lazo "for", se recorren todas las líneas donde se ha instalado un localizador, y de igual forma, se registran los nodos aguas abajo de la ubicación del localizador.
 3. Dentro del mismo lazo "for", se implementó un bucle "while" para visualizar el nodo aguas abajo del localizador ubicado. Posteriormente, se utiliza otro lazo iterativo para explorar todos los nodos vistos del anterior bucle e identificar todos los que se encuentren aguas abajo de los mismos.
 4. Se suman todas las distancias de las líneas que el localizador puede observar.
 5. Se implementa una estructura condicional donde la corriente mínima de falla debe ser mayor al valor de la corriente umbral del localizador y que la suma de las distancias debe ser menor a la distancia máxima y mayor a la distancia mínima (establecida por el usuario) que se tiene como restricción.
 6. Si cumple la condición anterior, se guardan los nodos vistos y se actualiza la lista de nodos aguas abajo.
 7. Retornar la lista de los nodos vistos.

2.4 Algoritmo Genético (AlgoritmoGenetico)

Se emplea el algoritmo genético con el objetivo de mutar la corriente umbral y la distancia, de modo que se encuentren sus respectivos valores óptimos.

Para implementar el algoritmo se establece la siguiente función objetivo:

$$\min F = \frac{\text{número de localizadores}}{\text{Distancia máxima}} \quad (2.2)$$

La función objetivo se planteó considerando que, a mayor número de localizadores de falla, existirá menor distancia entre ellos (con menor observabilidad); y, a mayor distancia, menor será el número de localizadores de falla (con mayor alcance). Por lo tanto, son dos variables que guardan una relación inversa y, por tanto, esta función objetivo fue definida como una división con el propósito de optimizar las dos variables.

Los parámetros del algoritmo genético para la optimización son:

- La corriente umbral óptima para los localizadores de falla, debe estar entre un valor máximo y mínimo tomando como referencia a la corriente de flujo. En términos matemáticos se tiene que:

$$k_{min} \times I_{flujo\ de\ carga} \leq I_{umbral} \leq k_{max} \times I_{flujo\ de\ carga} \quad (2.3)$$

- La distancia óptima de los localizadores de falla, debe ser un valor entre una distancia mínima y máxima que son definidas por el usuario en función de las características de la red eléctrica bajo análisis (distancia mínima) y las limitaciones tecnológicas de comunicación de los localizadores (distancia máxima). Lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$Distancia\ mínima \leq Distancia \leq Distancia\ máxima \quad (2.4)$$

- Número óptimo de localizadores de falla. (Este número es obtenido a través del Algoritmo de Greedy, que se encuentra dentro del algoritmo genético.)
- Reducir el tiempo de recorrido del personal de campo ante una falla, teniendo en cuenta que, 1 kilómetro lo recorren aproximadamente en 10 minutos (valor estimado obtenido en consultas verbales con empresas eléctricas de distribución).

En la Figura 2.6 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético desarrollado.

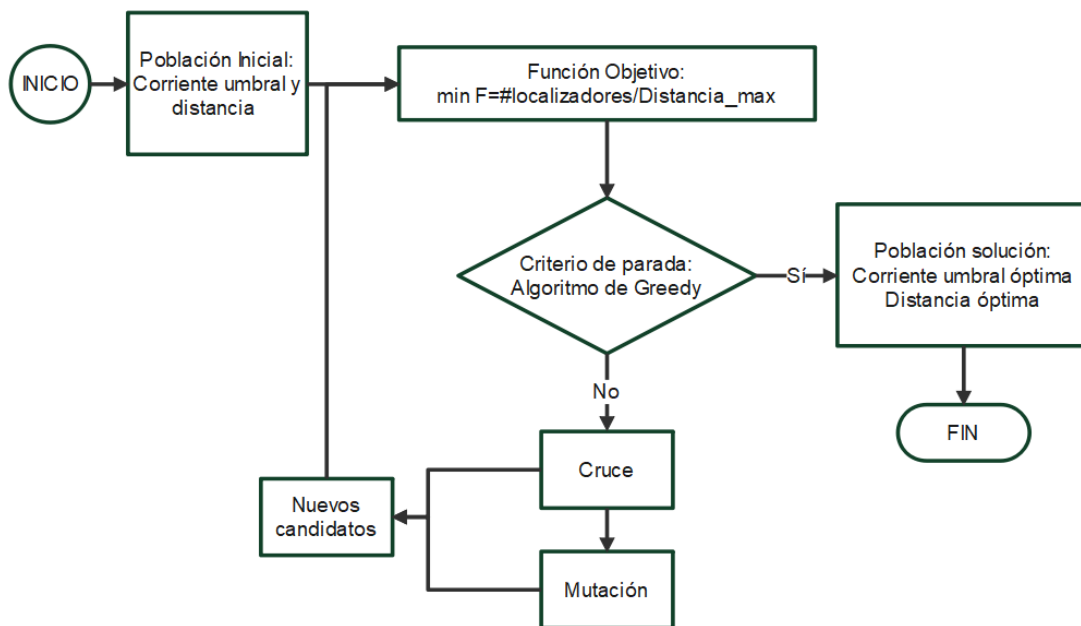


Figura 2.6. Diagrama de flujo del algoritmo genético desarrollado

Después de definir la función objetivo y los parámetros necesarios para inicializar el algoritmo genético, se ejecuta el algoritmo utilizando la biblioteca “pygad” que ofrece funciones específicas que brindan soporte a este tipo de algoritmos. Finalmente, se retornan los valores óptimos de corriente umbral y distancia.

2.5 Imprimir Resultados (ImprimirResultados)

Se emplea una función para visualizar los resultados de la rutina computacional desarrollada, de modo que el análisis posterior a su ejecución sea más eficiente y permita al usuario verificar que los resultados obtenidos son correctos.

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de la función implementada para mostrar los resultados.

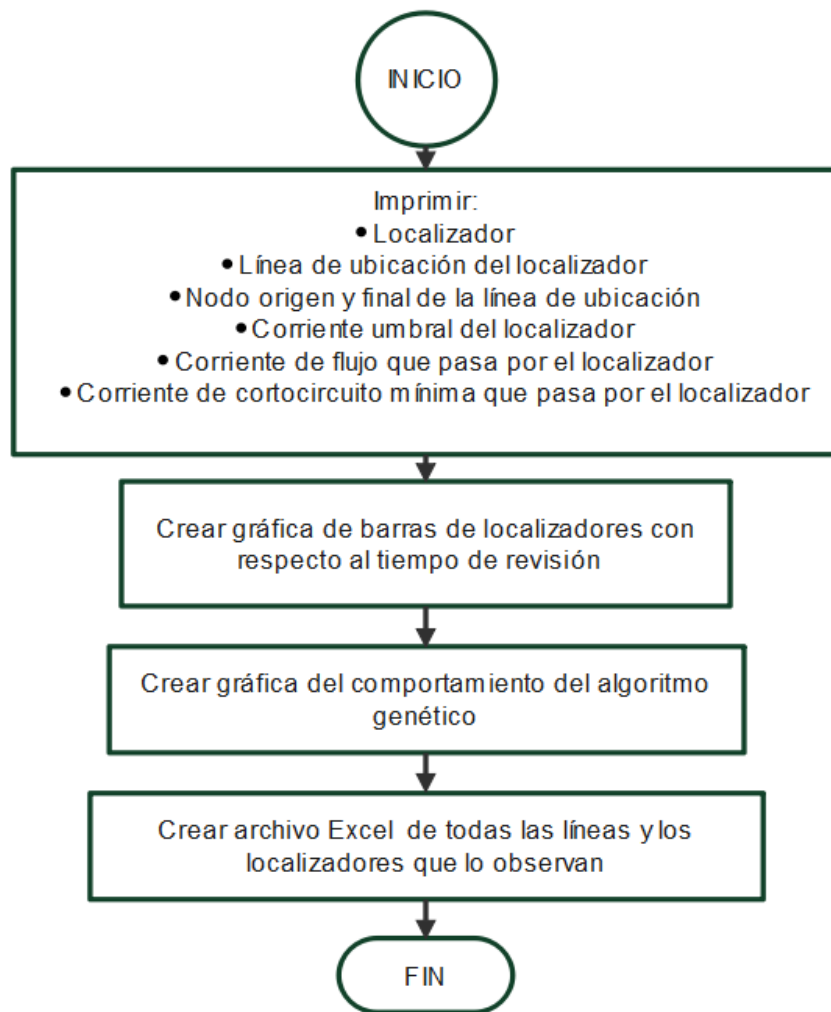


Figura 2.7. Diagrama de flujo de la función “Imprimir Resultados”.

Esta función despliega la siguiente información:

- Número de localizadores de falla.
- Nombre del localizador de falla.
- Nombre de la línea donde se ubicó el localizador.
- Nodo de origen y nodo de llegada donde se ubicó el localizador.
- Corriente umbral óptima del localizador.
- Corriente de flujo que midió el localizador.
- Corriente mínima de cortocircuito que detectó el localizador.

- Creación de un archivo Excel con los localizadores de falla y las líneas que visualiza.
- Creación de un gráfico de barras de los localizadores de falla con respecto al tiempo de recorrido para el tramo que observa el localizador.
- Creación de una gráfica del comportamiento del algoritmo genético, donde se observa cómo va mejorando con sus mutaciones.

2.6 Programa principal (main)

En el programa principal “main”, se tienen datos de entrada que el usuario debe definir según sus necesidades, como son:

- Posición de falla.
- Resistencia de falla.
- Reactancia de falla.
- Máxima corriente umbral.
- Mínima corriente umbral.
- Máxima distancia entre localizadores.
- Mínima distancia entre localizadores.

Para ejecutar el programa, se requiere ingresar los datos de entrada mencionados previamente. Luego, el programa adquiere información de las líneas, realiza una simulación de flujo de potencia y cortocircuitos en todas las líneas identificadas. A continuación, se inicia el algoritmo genético para determinar y ajustar la corriente umbral del localizador de fallas y la distancia máxima entre localizadores. Una vez que el criterio de parada del algoritmo genético se activa, se procede a ejecutar el algoritmo Greedy para obtener la ubicación óptima de los localizadores de falla. Finalmente, se visualizan los resultados obtenidos de la rutina computacional.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de la herramienta computacional desarrollada, abordando dos casos de estudio: uno para parte de una red eléctrica estándar IEEE de prueba, y otro para una red real que corresponde a un alimentador de una empresa de distribución en Ecuador. Los resultados arrojados por la herramienta son analizados detalladamente.

- **Red de prueba**

Se seleccionó parte de la red estándar IEEE de 33 nodos, estableciéndose un alimentador radial con las características que se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características – Red de prueba

Parámetros	Valor	Unidad
Nodos	17	
Líneas	16	
Longitud de líneas	304.8	m
Número de cargas	15	
Carga total real	2043.94	kVA
Red Equivalente		
Voltaje Nominal	12.66	kVLL
Niveles de cortocircuito		
Trifásico	7.8	MVA
Monofásico	1.4	MVA

La Figura 3.1 muestra la red de prueba seleccionada para este caso de estudio.

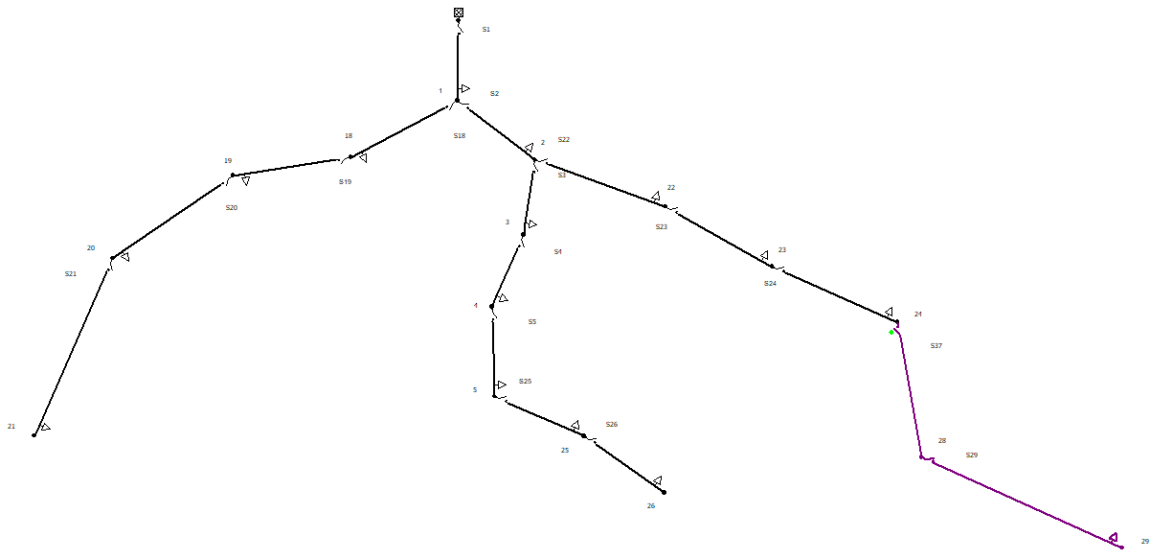


Figura 3.1. Red eléctrica de prueba seleccionada.

Una vez que la red eléctrica de prueba fue modelada en el software CYMDIST, se verificó su correcto funcionamiento a través de simulaciones de flujos de potencia y de cortocircuitos, para posteriormente usar la rutina computacional sobre este sistema.

En la Figura 3.2 se visualiza los resultados obtenidos con la rutina computacional.

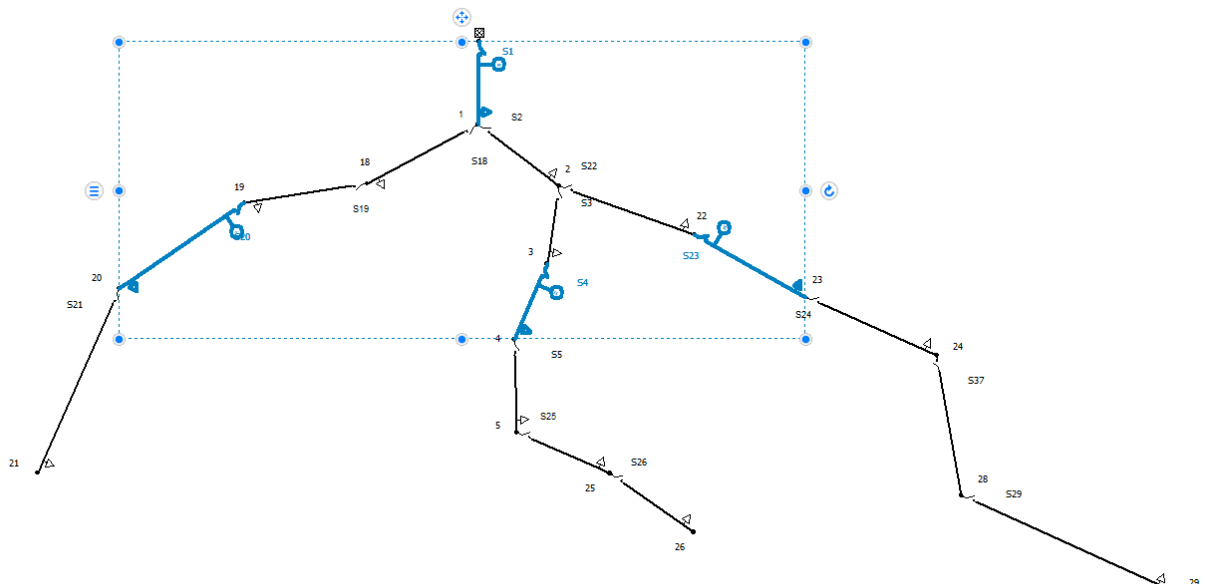


Figura 3.2. Resultado de la ubicación óptima de los localizadores de falla en la red de prueba.

Como se aprecia en la Figura 3.2, luego de la ejecución de la rutina computacional, los resultados arrojados indican que se han incorporado cuatro localizadores de falla en las líneas específicas (tramos en color azul de la Figura 3.2). Es importante destacar que, previo a la ejecución de la herramienta desarrollada, el usuario tiene la capacidad de definir los parámetros mencionados en el capítulo anterior, incluyendo tanto la distancia mínima como la máxima de ubicación de localizadores, estableciéndolas según las necesidades de la red y limitaciones tecnológicas de los dispositivos de localización considerados. En este caso, se ha configurado una distancia mínima de 200 metros y una máxima de 2000 metros. Estos parámetros se establecieron en relación a la distancia que tiene las líneas eléctricas y al número de tramos de la red.

En la Figura 3.3, se presenta en primer lugar los resultados obtenidos mediante el algoritmo genético. Esto incluye un vector con los valores óptimos de corriente umbral para los localizadores, de modo que puedan ser colocados en todas las líneas, en caso de ser necesario, así como otro vector con los valores óptimos de la distancia que puede ser observada por los localizadores que se ubiquen en todas las líneas, de ser necesario. Además, se exhibe el valor de la función objetivo con el que finalizó el algoritmo genético, siendo en este caso de 0.002187. Este resultado es altamente satisfactorio, aunque el objetivo ideal es alcanzar un valor de 0.

```
>>> Ejecutando el script Python: main
Corriente umbral óptima:

[1.33502366 1.22664039 1.21739525 1.43581256 1.44253075 1.57732596 1.46329509 1.79609547 1.72961874 1.4518338 1.58603063
1.58731264 1.67640464 1.60056777]
Distancia óptima:

[1026.90818608 779.81767295 1759.30969304 1925.24932867 1871.08324586 1537.31653827 1344.17838616 1209.14079939 1612.03598623
209.70939689 1015.05075519 961.34385952 1956.64693644 307.78880274]
Fitness de la mejor solución:

0.0021872265966754157
Datos Obtenidos:
Línea S1160-1 -> 1-2 Corriente Flujo: 71.0 Corriente Cortocircuito min: 191.0 Longitud: 304.8
Línea S1170-8 -> 18-19 Corriente Flujo: 13.6 Corriente Cortocircuito min: 189.5 Longitud: 304.8
Línea S1170-13 -> 23-24 Corriente Flujo: 21.6 Corriente Cortocircuito min: 182.8 Longitud: 304.8
Línea S1162-1 -> 3-4 Corriente Flujo: 12.0 Corriente Cortocircuito min: 188.0 Longitud: 304.8
Línea S1170-14 -> 5-25 Corriente Flujo: 6.0 Corriente Cortocircuito min: 182.6 Longitud: 304.8
Línea S1162 -> 2-3 Corriente Flujo: 18.5 Corriente Cortocircuito min: 189.3 Longitud: 304.8
Línea S1160 -> 0-1 Corriente Flujo: 94.3 Corriente Cortocircuito min: 191.5 Longitud: 304.8
Línea S1170-10 -> 20-21 Corriente Flujo: 4.5 Corriente Cortocircuito min: 179.3 Longitud: 304.8
Línea S1170-9 -> 19-20 Corriente Flujo: 9.0 Corriente Cortocircuito min: 182.1 Longitud: 304.8
Línea S1170-12 -> 22-23 Corriente Flujo: 43.2 Corriente Cortocircuito min: 187.1 Longitud: 304.8
Línea S1164 -> 4-5 Corriente Flujo: 8.9 Corriente Cortocircuito min: 186.4 Longitud: 304.8
Línea S1170-7 -> 1-18 Corriente Flujo: 18.1 Corriente Cortocircuito min: 191.1 Longitud: 304.8
Línea S1170-15 -> 25-26 Corriente Flujo: 3.0 Corriente Cortocircuito min: 181.9 Longitud: 304.8
Línea S1170-11 -> 2-22 Corriente Flujo: 48.0 Corriente Cortocircuito min: 189.3 Longitud: 304.8
Ubicación de Localizadores:
Localizador 1 -> Línea S1160 -> 0-1 Corriente Flujo: 94.3 Corriente Umbral: 137.99 Corriente min: 191.5 Distancia: 1828.8
Localizador 2 -> Línea S1170-8 -> 18-19 Corriente Flujo: 13.6 Corriente Umbral: 16.68 Corriente min: 189.5 Distancia: 914.4
Localizador 3 -> Línea S1170-12 -> 22-23 Corriente Flujo: 43.2 Corriente Umbral: 62.72 Corriente min: 187.1 Distancia: 609.6
Localizador 4 -> Línea S1164 -> 4-5 Corriente Flujo: 8.9 Corriente Umbral: 14.12 Corriente min: 186.4 Distancia: 914.4
Numero Localizadores: 4 Distancia maxima Localizador:1828.8
```

Figura 3.3. Resultados mostrados en la consola de Python.

Luego del valor alcanzado en la función objetivo, en la Figura 3.3 se detallan los valores de la corriente de flujo, la corriente de cortocircuito mínima y la longitud de todas las líneas de la red eléctrica. Adicional, se proporciona información sobre los localizadores de falla

incorporados, que incluye la ubicación de la línea donde se implementa el localizador, nodo de origen y destino, corriente umbral, corriente mínima de cortocircuito que sensa y distancia óptima.

Finalmente, se obtiene 4 localizadores de falla, y se observa que el localizador 1 posee el mayor alcance (Distancia máxima Localizador: 1828.8 metros).

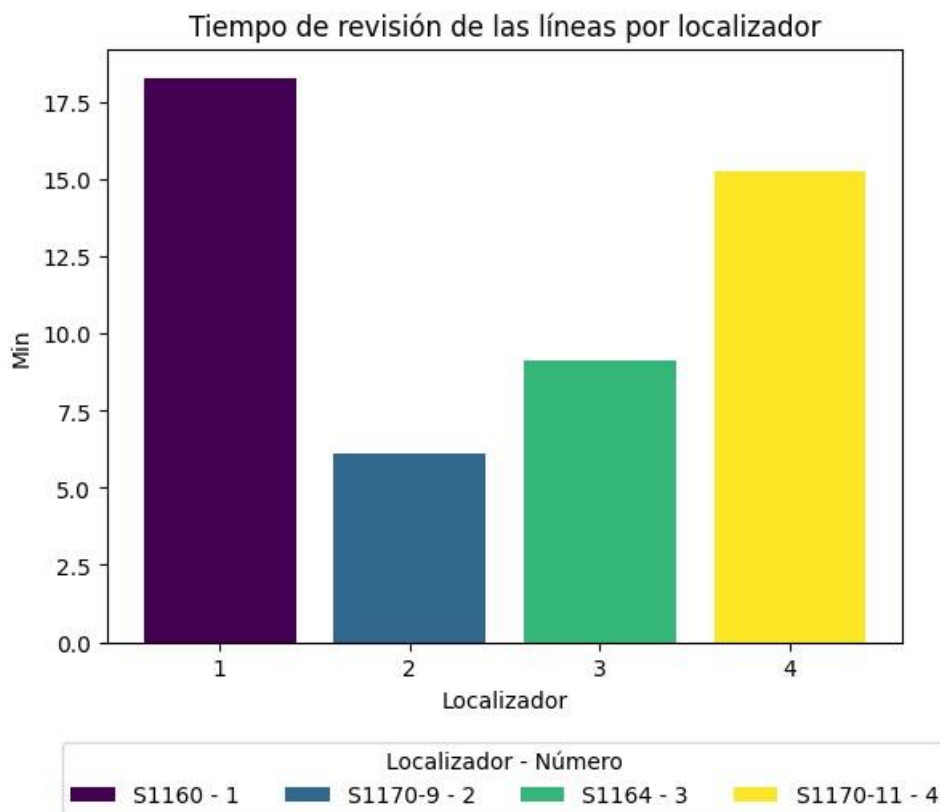


Figura 3.4. Diagrama de barras del tiempo de revisión por localizador.

En la Figura 3.4 se presenta un gráfico de barras generado por la rutina computacional, considerando que el grupo de campo dedica aproximadamente 10 minutos por cada kilómetro inspeccionado. En consecuencia, se observa que el localizador 1, situado en la línea "S1160-1" (cabecera del alimentador) requiere más tiempo para ser revisado, con una estimación de alrededor de 17.5 minutos. Por otro lado, el localizador 2, ubicado en la línea "S1170-9", tiene un tiempo aproximado de 5 minutos, siendo el que toma menos tiempo de inspección.

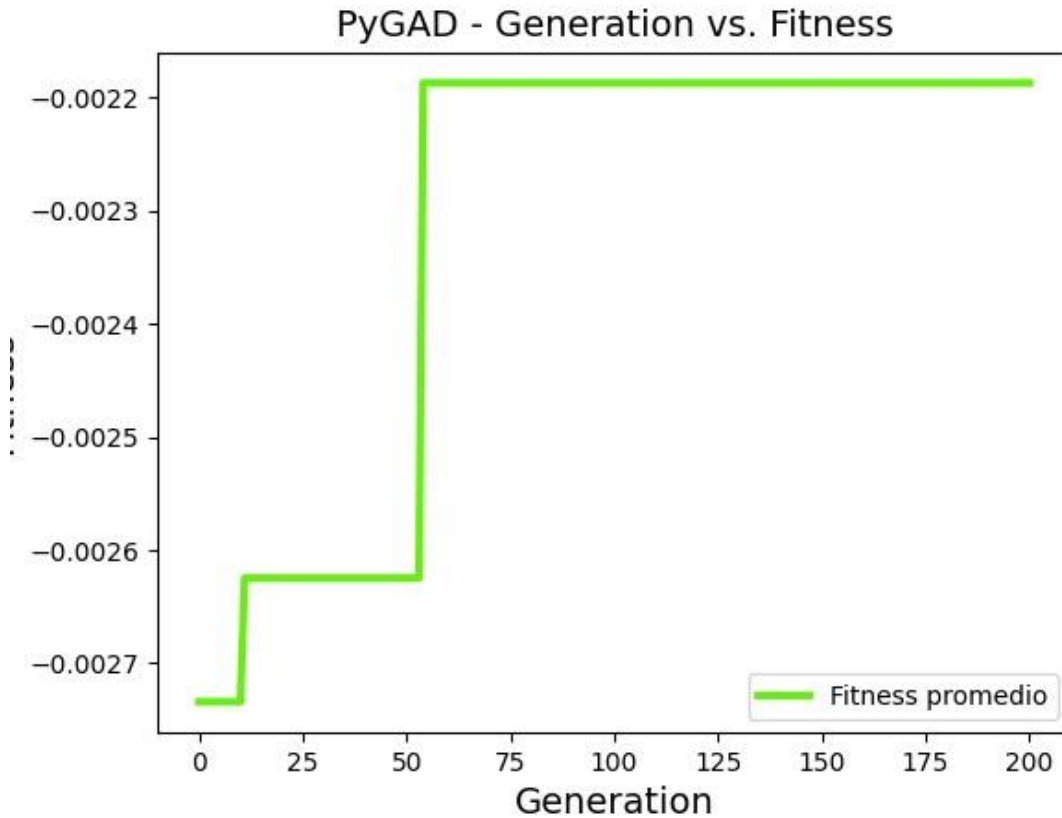


Figura 3.5. Comportamiento del algoritmo genético.

En la Figura 3.5 se exhibe la evolución del algoritmo genético en cada generación en función del valor de la función objetivo. Es evidente cómo la solución experimenta mejoras progresivas y converge hacia un valor específico, previamente mencionado, que asciende a 0.002187.

En la Tabla 3.2 se resumen los registros de datos de todas las líneas de la red analizada, información que se encuentra organizada en esta tabla mediante una codificación cromática (código de colores). Esta información se encuentra almacenada en el archivo Excel que genera la herramienta. De esta manera, las líneas resaltadas en morado corresponden a aquellas observadas por el localizador 1, mientras que las líneas resaltadas en celeste son las que se encuentran bajo la observación del localizador 2. Del mismo modo, las líneas marcadas en verde están bajo la observación del localizador 3, y, por último, las líneas destacadas en amarillo son aquellas que están dentro del área de observabilidad del localizador 4.

Tabla 3.2. Datos resultantes sobre la observabilidad de los localizadores – Red de prueba

Número	Nodo_i	Nodo_j	Corriente Flujo [A]	Corriente Min. Cortocircuito [A]	Longitud [m]
S1160	0	1	117.8	191.5	304.8
S1160-1	1	2	94.9	191	304.8
S1162	2	3	18.6	189.3	304.8
S1162-1	3	4	12	188	304.8
S1170-7	1	18	18.1	191.1	304.8
S1170-8	18	19	13.6	189.5	304.8
S1170-10	20	21	4.5	179.3	304.8
S1170-9	19	20	9	182.1	304.8
37	24	28	29.9	178.9	304.8
S1170-11	2	22	72.6	189.3	304.8
S1170-12	22	23	68	187.1	304.8
S1170-13	23	24	47.8	182.8	304.8
S1170-18	28	29	29.9	176.3	304.8
S1164	4	5	8.9	186.4	304.8
S1170-14	5	25	6	182.6	304.8
S1170-15	25	26	3	181.9	304.8

En la Tabla 3.3 se presentan los datos correspondientes a los localizadores de falla, organizados mediante un esquema de codificación cromática. En esta tabla se incluyen los resultados específicos relacionados con el nombre de la línea, los nodos de origen y destino, la corriente umbral, la corriente mínima de cortocircuito, la longitud, el tiempo de inspección (que le tomaría al personal de campo), así como las líneas que son objeto de observación por cada uno de los localizadores incorporados.

Tabla 3.3. Ubicación óptima y observabilidad de los localizadores de falla – Red de prueba.

N	Número	Nodo_i	Nodo_j	Corriente Flujo [A]	Corriente Umbral [A]	Corriente Mínima [A]	Longitud [m]	Tiempo [min]	Líneas Vistas
1	S1160	0	1	117.8	167.05	191.5	1828.8	18.29	['S1160', 'S1160-1', 'S1170-7', 'S1170-8', 'S1162', 'S1162-1']

2	S1170-9	19	20	9	11.11	182.1	609.6	6.1	['S1170-9', 'S1170-10']
3	S1164	4	5	8.9	15.64	186.4	914.4	9.14	['S1164', 'S1170-14', 'S1170-15']
4	S1170-11	2	22	72.6	94.46	189.3	1524	15.24	['S1170-11', 'S1170-12', 'S1170-13', '37', 'S1170-18']

Sobre la base de la información detallada y el análisis realizado, se pueden observar resultados apropiados que concuerdan con los objetivos establecidos de este trabajo, logrando determinar una ubicación óptima de los cuatro localizadores de falla requeridos para la red de prueba, con los cuales se tiene una observabilidad completa del alimentador analizado, cumpliendo con las funciones objetivo establecidas y las restricciones pertinentes. Además, se destaca la precisión que se obtuvo para la ubicación efectiva de los localizadores de falla.

- **Red de un alimentador de una empresa distribuidora del Ecuador**

Se analizó una red de un alimentador caracterizado por su topología radial. En esta configuración, la red incluye diversas tipologías de líneas, como aéreas, monofásicas, bifásicas y trifásicas. En la Tabla 3.4 se muestran las características de la red.

Tabla 3.4. Características – Red real

Parámetros	Valor	Unidad
Nodos	1146	
Líneas aéreas	1056	
Número de cargas	110	
Carga capacidad conectada	2823.42	kVA
Red Equivalente		
Tensión Nominal	13.8	kVLL
Niveles de cortocircuito		
Trifásico	53.3	MVA
Monofásico	19.1	MVA

La Figura 3.6 muestra la red real de un alimentador seleccionado de la Empresa Eléctrica Ambato S.A. (EEASA).

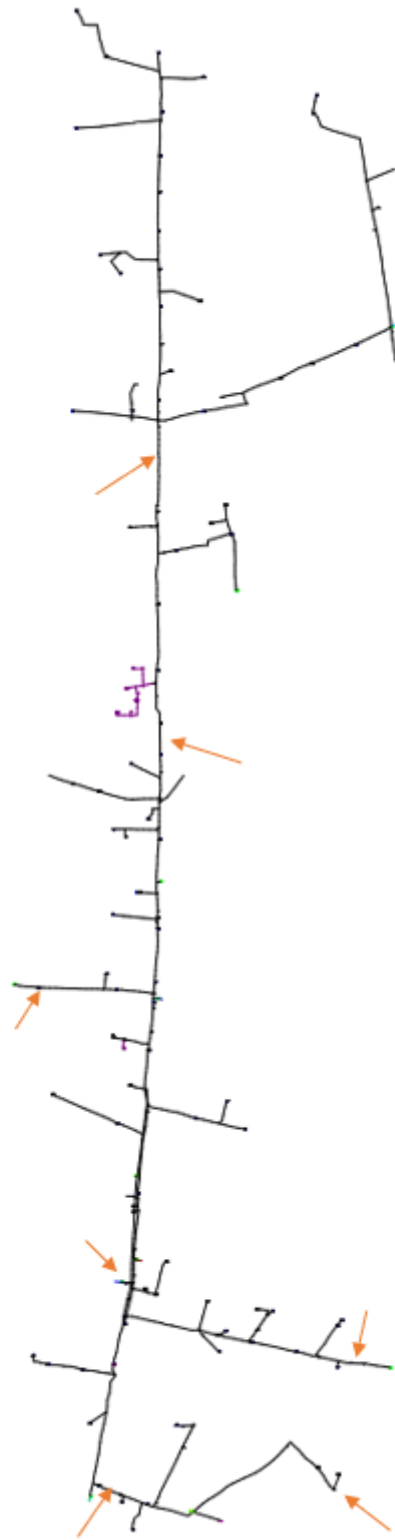


Figura 3.7. Resultado de la ubicación óptima de localizadores de falla en la red de un alimentador de una empresa de distribución.

Como se aprecia en la Figura 3.7, durante la simulación de la rutina computacional, se han incorporado siete localizadores de falla en las líneas específicas. Es importante destacar que el usuario tiene la capacidad de definir los parámetros, incluyendo tanto la distancia mínima como la máxima, estableciéndolas según sus necesidades. En este caso, se ha configurado una distancia mínima de 1000 metros y una máxima de 10000 metros. Estos parámetros se establecieron en relación a la distancia que tiene las líneas eléctricas y al número de tramos de la red.

```
Ubicación de Localizadores:
Localizador 1 -> Línea 996214_MTA -> MTA_S_996211-MTA_S_996215 Corriente Flujo: 0.1 Corriente Umbral: 0.14
Corriente min: 1288.4 Distancia: 4115.62
Localizador 2 -> Línea 311924_MTA -> MTA_S_709835-MTA_L_63033 Corriente Flujo: 0.2 Corriente Umbral: 0.35
Corriente min: 1009.7 Distancia: 2373.63
Localizador 3 -> Línea 321395_MTA -> MTA_S_321395-MTA_S_321396 Corriente Flujo: 5.5 Corriente Umbral: 9.22
Corriente min: 1920.0 Distancia: 1793.44
Localizador 4 -> Línea 1118255_MTA -> MTA_S_1118255-MTA_S_1118256 Corriente Flujo: 0.1 Corriente Umbral:
0.13 Corriente min: 965.4 Distancia: 2516.06
Localizador 5 -> Línea 994624_MTA -> MTA_S_994625-MTA_S_994624 Corriente Flujo: 2.2 Corriente Umbral: 3.37
Corriente min: 908.4 Distancia: 2309.41
Localizador 6 -> Línea 265928_MTA -> MTA_S_265928-MTA_S_715781 Corriente Flujo: 5.1 Corriente Umbral: 6.67
Corriente min: 1519.8 Distancia: 1523.18
Localizador 7 -> Línea 15828_MTA -> MTA_S_15828-MTA_S_10263 Corriente Flujo: 1.7 Corriente Umbral: 2.51
Corriente min: 773.2 Distancia: 2627.65
Numero Localizadores: 7 Distancia maxima Localizador:4115.62296
```

Figura 3.8. Resultados mostrados en la consola de Python.

En la Figura 3.8, se proporciona información sobre los localizadores de falla incorporados, que incluye la ubicación de la línea donde se implementa el localizador, nodo de origen y destino, corriente umbral, corriente mínima de cortocircuito que sensa y distancia óptima.

Finalmente, se obtienen 7 localizadores de falla, y se observa que el localizador 1 posee el mayor alcance (Distancia máxima Localizador: 4115.62296 metros).

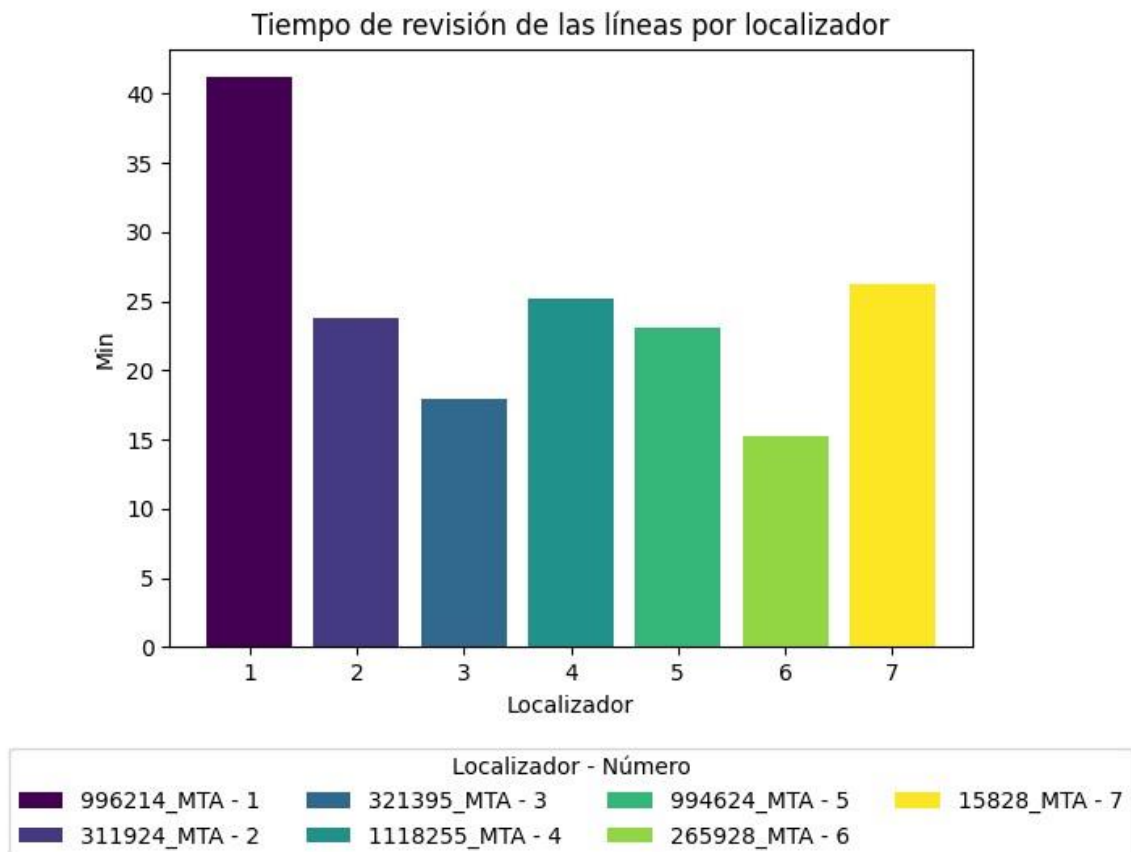


Figura 3.9. Diagrama de barras del tiempo de revisión por localizador.

En la Figura 3.9 se presenta un gráfico de barras generado por la rutina computacional, considerando que el grupo de campo dedica aproximadamente 10 minutos por cada kilómetro revisado. En consecuencia, se observa que el localizador 1, situado en la línea "996214_MTA-1", requiere más tiempo para ser revisado, con una estimación de alrededor de 40 minutos. Por otro lado, el localizador 6, ubicado en la línea "265928_MTA-6", tiene un tiempo aproximado de 15 minutos, siendo el que toma menos tiempo de inspección.

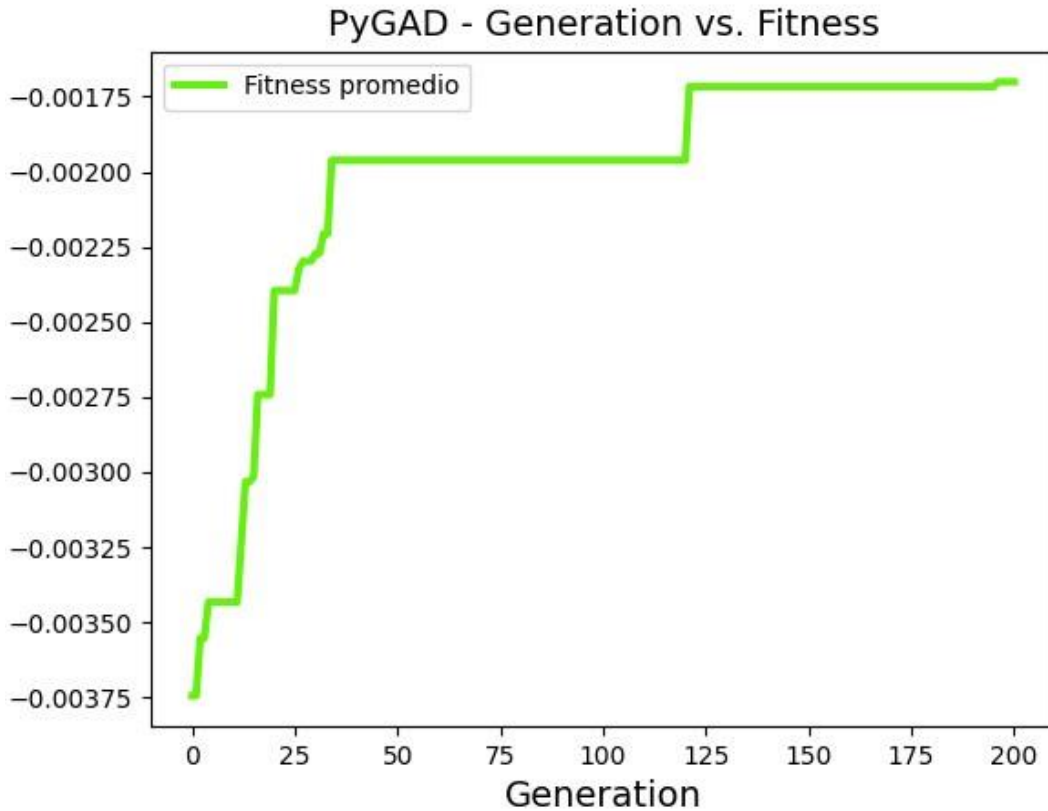


Figura 3.10. Comportamiento del algoritmo genético.

En la Figura 3.10 se exhibe la evolución del algoritmo genético en cada generación en función del valor de la función objetivo. Es evidente cómo la solución experimenta mejoras progresivas y converge hacia un valor específico, que asciende a 0.00175 en este caso.

En la Tabla 3.5, se presentan los datos correspondientes a los localizadores de falla, organizados mediante un esquema de codificación cromática. En esta tabla se incluyen los resultados específicos relacionados con el nombre de la línea, los nodos de origen y destino, la corriente umbral, la corriente mínima de cortocircuito, la longitud, el tiempo de revisión, por cada uno de los localizadores incorporados.

Si se busca obtener más detalles sobre las líneas de la red y las líneas observadas por cada localizador, se puede consultar la sección del Anexo I, para obtener información adicional.

Tabla 3.5. Datos resultantes sobre la observabilidad de los localizadores – Red real

N	Device Number	Nodo_i	Nodo_j	Corriente Flujo [A]	Corriente Umbral [A]	Corriente Mínima [A]	Longitud [m]	Tiempo [min]
1	996214_MTA	MTA_S_99621_1	MTA_S_99621_5	0.1	0.14	1288.4	4115.62	41.16
2	311924_MTA	MTA_S_70983_5	MTA_L_63033	0.2	0.35	1009.7	2373.63	23.74
3	321395_MTA	MTA_S_32139_5	MTA_S_32139_6	5.5	9.22	1920	1793.44	17.93
4	1118255_MTA	MTA_S_11182_55	MTA_S_11182_56	0.1	0.13	965.4	2516.06	25.16
5	994624_MTA	MTA_S_99462_5	MTA_S_99462_4	2.2	3.37	908.4	2309.41	23.09
6	265928_MTA	MTA_S_26592_8	MTA_S_71578_1	5.1	6.67	1519.8	1523.18	15.23
7	15828_MTA	MTA_S_15828	MTA_S_10263	1.7	2.51	773.2	2627.65	26.28

Para concluir este capítulo, se puede apreciar que la rutina computacional ha generado resultados satisfactorios tanto para una red de prueba como para una red real. Es relevante destacar que, en el caso específico de la red del alimentador de la EEASA, se ha considerado únicamente las líneas trifásicas y las líneas aéreas. La omisión de las líneas subterráneas y de las líneas bifásicas y monofásicas, fue motivado debido a que, las primeras, en un contexto de un alimentador real, representan un porcentaje reducido de todos sus componentes; mientras que las segundas, no viabilizan la simulación de todos los tipos de cortocircuito que considera la metodología empleada (punto de mejora para trabajos futuros señalado en la sección de Recomendaciones).

3.2 Conclusiones

- La implementación de la herramienta computacional en Python ha demostrado ser útil para determinar la ubicación óptima de localizadores de falla. Por otro lado, la elección del algoritmo de Greedy se ha mostrado acertada, permitiendo una búsqueda de soluciones correctas y logrando convergencia hacia resultados óptimos.

- Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva, incorporando conceptos fundamentales de la teoría del algoritmo de Greedy, principio de funcionamiento del localizador de fallas, y conocimientos específicos sobre el software CYMDIST.
- La definición de la función objetivo y restricciones se basa en la comprensión detallada de los principios teóricos revisados, asegurando una representación adecuada de los objetivos del estudio.
- La estructuración de la herramienta computacional se llevó a cabo con un diseño modular, que permite una fácil adaptabilidad y comprensión del código. La implementación en Python facilita la manipulación y extensión del código, proporcionando flexibilidad para futuras mejoras y ajustes.
- La aplicación de la rutina computacional a una red eléctrica de prueba ha permitido validar la efectividad de la metodología y de la herramienta. De igual forma, la depuración realizada en el código en respuesta a la aplicación en una red de prueba mejoró la precisión de la herramienta, validando su robustez.
- La aplicación exitosa de la metodología y de la herramienta computacional en una red eléctrica real, que corresponde a un alimentador de la Empresa Eléctrica Ambato S.A., confirma una solución factible y correcta ante la problemática planteada.
- Los resultados obtenidos representan aportes valiosos sobre la ubicación óptima de localizadores de falla en contextos reales, contribuyendo a la gestión eficiente del sistema eléctrico de distribución.

3.3 Recomendaciones

- Se recomienda para trabajos futuros, agregar condiciones para almacenar líneas monofásicas y bifásicas, puesto que, la rutina computacional aquí desarrollada almacena únicamente líneas trifásicas.
- Se sugiere desarrollar un algoritmo para la identificación automática de nodos de inicio y fin. En la red del alimentador de la EEASA, se enfrentó un problema de nomenclatura que causó la inversión de líneas. Este inconveniente fue corregido manualmente, y la implementación de un algoritmo automatizado puede prevenir futuros errores de este tipo.

- Para reducir el tiempo de simulación, se plantea la posibilidad de substituir el algoritmo genético actual por otro más rápido. Este cambio podría optimizar el rendimiento del proceso sin comprometer la calidad de los resultados obtenidos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. F. Flores Zambrano y H. G. Conce Zaruma, Estudio para determinar la ubicación óptima de localizadores de falla en el sistema de distribución aéreo de los alimentadores #0321, #0526, #0323, #0523, #1822, #0521, #0921, #1222 de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, Cuenca: Universidad Católica de Cuenca, 2017.
- [2] D. Morales, D. Icaza y G. Ponce, Ubicación mejorada de localizadores de falla en redes de distribución aéreas, Chile: IEEE ICA/ACCA , 2016.
- [3] M. Abad, «Algoritmos Voraces,» Facultat d'Informàtica, U.P.C., Barcelona, 2007.
- [4] D. d. C. d. I. C. e. I.A., «Universidad de Granada,» 2010. [En línea]. Available: <https://elvex.ugr.es/decsai/algorithms/slides/4%20greedy.pdf>. [Último acceso: 14 12 2023].
- [5] C. International, «EATON Powering Business Wolrdwide,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.cyme.com/es/software/cymdist/>. [Último acceso: 14 12 2023].
- [6] A. Visus, «ESIC,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.esic.edu/rethink/tecnologia/para-que-sirve-python>. [Último acceso: 14 12 2023].
- [7] CYME, «MY CYME,» Library, 23 02 2023. [En línea]. Available: [https://my.cyme.com/library/fa2175fa-bb6f-42a5-98c6-8b8e09bf2e34\(v=cyme-9.3\)](https://my.cyme.com/library/fa2175fa-bb6f-42a5-98c6-8b8e09bf2e34(v=cyme-9.3)). [Último acceso: 14 12 2023].
- [8] J. Alvarez, V. Hurtado y H. Trujillo, «Algoritmos Genéticos,» Ingeniería en Sistema ICESI, Cali, 1995.
- [9] A. Panesso Hernández, «LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN ALIMENTADORES PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CONSIDERANDO INCERTIDUMBRES EN LA CARGA Y CON PRESENCIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2013.
- [10] VIAKON, «Sistemas y redes de distribución (Manual Eléctrico),» VIAKON, 2011.
- [11] J. Cervantes Juarez, «Sistema de distribución de energía eléctrica,» Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1995.
- [12] W. Valdiviezo Regalado, «Coordinación de protecciones eléctricas de los alimentadores primarios del sistema eléctrico Tena,» Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, 2013.
- [13] R. Mujal Rosas, «Protección de sistemas eléctricos de potencia,» Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2022.
- [14] L. Pravos García, «Análisis de flujos de carga para el análisis de redes de distribución. Implementación del algoritmo "Forward and Backward",» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.

[15] Megger, «Metrysense 5200 Smart Grid medium voltage sensor with 0.5% voltage measurement accuracy,» Megger.