



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

Localización óptima de reconectores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autor

Silva Poaquiza Marco Vinicio

Tutor

Barbosa Galarza José Efrén Mg.

LATACUNGA – ECUADOR

2022


AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Localización óptima de reconectadores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución” presentado por Silva Poaquiza Marco Vinicio, para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, mayo, 17, 2022

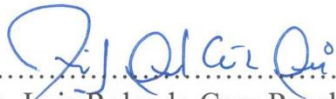


.....
Mg. José Efrén Barbosa Galarza
CC.: 0501420723

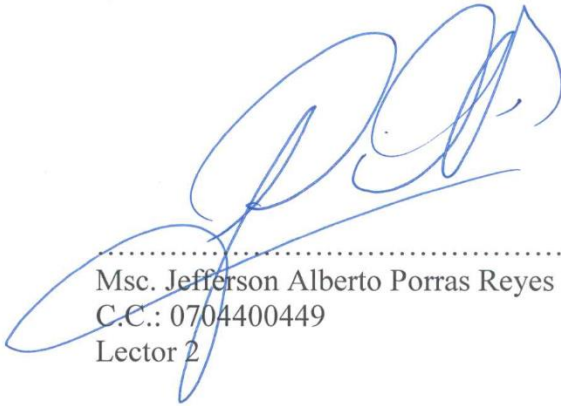
AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: Localización óptima de reconectores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, mayo, 17, 2022



.....
Msc. Luis Rolando Cruz Panchi
C.C.: 0502595176
Presidente del Tribunal



.....
Msc. Jefferson Alberto Porras Reyes
C.C.: 0704400449
Lector 2



.....
Msc. Gabriela Cristina Cabrera Celi
C.C.: 1104683873
Lector 3

DEDICATORIA

La presente investigación va dedicada al esfuerzo y apoyo incondicional de mis señores padres Efigenia y Mario (†).

Marco Vinicio Silva Poaquiza

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a la UTC, a cada uno de los señores docentes por los conocimientos y experiencias compartidas.

Marco Vinicio Silva Poaquiza

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, mayo, 17, 2022



.....
Marco Vinicio Silva Poaquiza
C.C.: 1803738994

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, mayo, 17, 2022



.....
Marco Vinicio Silva Poaquiza
C.C.: 1803738994

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Localización óptima de re conectadores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, mayo, 17, 2022


.....
Msc. Luis Rolando Cruz Panchi
C.C.: 0502595176

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Título: Localización óptima de reconectores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución.

Autor: Silva Poaquiza Marco Vinicio

Tutor: Barbosa Galarza José Efrén Mg

RESUMEN

La creciente demanda e importancia de la energía eléctrica en la actualidad, hacen que las Empresas Distribuidoras estén en constante desarrollo de mejoras en las redes eléctricas, buscando garantizar un servicio continuo, confiable y de calidad al usuario final. Los sistemas de distribución están conformados por un conjunto de componentes, entre ellos los alimentadores de medio voltaje, que a su vez contiene equipos de corte y protección como los denominados reconectores automáticos; para mejorar la confiabilidad de un alimentador de medio voltaje justamente se hace uso de éstos equipos, para minimizar la duración (SAIDI) y la frecuencia (SAIFI) de las interrupciones de servicio. De donde nace la necesidad de definir un método de optimización para la localización de reconectores con base a una mejora de la confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución. Para lo cual la literatura especializada sobre optimización, recomienda la utilización de una metodología heurística conocida con Algoritmos Genéticos, principalmente por explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones. Los algoritmos genéticos imitan la evolución biológica, consiste de tres etapas: selección, cruzamiento y mutación, obteniéndose así una nueva población mejorada. Las herramientas informáticas OpenDSS y Matlab son utilizadas para el desarrollo de los algoritmos de modelamiento - simulación e interface - optimización, respectivamente. El resultado obtenido es satisfactorio, pues se obtuvo la localización óptima de los reconectores con una mejora en la confiabilidad del sistema, misma que fue elegida de un conjunto de posibles soluciones que proporciona la metodología.

PALABRAS CLAVE: Confiabilidad; Optimización; Algoritmo Genético; SAIDI; SAIFI; Reconector.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

TOPIC: "OPTIMUM LOCATION OF RECLOSERS, WITH RELIABILITY CRITERIA INTO A REAL MEDIUM VOLTAGE FEEDER FROM ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM".

Author: Silva Poaquiza Marco Vinicio

Tutor: José Efrén Barbosa Galarza Mg

ABSTRACT

The increasing demand and electricity energy today importance makes, what the Distribution Enterprises are constantly, improvements development into electrical networks, by seeking to ensure a continuous, reliable and quality service to the end user. Distribution systems are conformed by components set, between them, the medium voltage feeders, what in turn, it contains cutting and protection equipment, such as the so-called automatic reclosers; for improving a medium voltage feeder reliability, justly, is made use this equipments, to minimize the duration (SAIDI) and the service interruptions frequency (SAIFI). Which the specialized literature on optimization recommends a heuristic methodology known as Genetic Algorithms, mainly, to explore the solutions space into multiple directions. Genetic algorithms mimic biological evolution, it consists three stages: selection, crossing and mutation, thus, getting a new improved population. The OpenDSS and Matlab software tools are used to develop the modeling-simulation and interface-optimization algorithms, respectively. The got result is satisfactory, since was got the reclosers optimal location with an improvement into system reliability, which was chosen from possible solutions set provided by the methodology.

KEYWORDS: Reliability, optimization, genetic algorithm, SAIDI, SAIFI, recloser.

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número:0502666514 Magister en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "**Localización óptima de reconectadores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución**" de: Silva Poaquiza Marco Vinicio, aspirante a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



Mg. Marco Paul Beltrán Semblantes
0502666514



CENTRO
DE IDIOMAS

Latacunga, mayo, 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
1 CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA - METODOLÓGICA.....	7
1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte..	7
1.1.1 Sistema Eléctrico de Potencia.	7
1.1.2 Sistema Eléctrico de Distribución.	8
1.1.3 Planificación del Sistema de Distribución.	9
1.1.4 Investigación Bibliográfica.	10
1.1.5 Discusión.....	18
1.2 Fundamentación Teórica.	25
1.2.1 Reconectores Automáticos.	25
1.2.2 Optimización.	26
1.2.3 Métodos de Optimización.	26
1.2.4 Optimización por Algoritmos Evolutivos.	28
1.2.5 Optimización por Algoritmos Genéticos.	29
1.2.6 Confiabilidad.....	31
1.3 Fundamentación Metodológica.	33
1.3.1 Arquitectura de la Solución.....	34
1.3.2 Métodos de Investigación.	35
1.4 Conclusiones.	36
2 CAPITULO II. DESARROLLO DE LA PROPUESTA	38
2.1 Título del proyecto.	38
2.2 Objetivo del proyecto.	38
2.3 Descripción de la propuesta.....	38

2.4	Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.	40
2.4.1	Definición de datos de entrada.	43
2.4.2	Desarrollo de interface.	45
2.4.3	Pre-localización de RA.	46
2.4.4	Flujo de carga.	47
2.4.5	Cálculo de parámetros de la FO y valor óptimo.	50
2.4.6	Aplicación Algoritmo Genético.	57
2.4.7	Resultados obtenidos.	61
2.5	Conclusiones.	64
3	CAPITULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA	
	66	
3.1	Análisis de los resultados.	66
3.1.1	Resultados software Matlab.	66
3.1.2	Resultados software OpenDSS.	75
3.2	Validación técnica - económica de los resultados.	78
3.3	Conclusiones.	81
	CONCLUSIONES GENERALES	83
	RECOMENDACIONES	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	85
	ANEXOS	90
	Lista de Acrónimos.	90
	Parámetros de configuración circuito de prueba IEEE 12 barras.....	92
	Costo Referencial.	105

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1.1) Frecuencia de fallas	33
(1.2) Duración media de las fallas.....	33
(1.3) Indisponibilidad	33
(1.4) Indicador SAIFI	33
(1.5) Indicador SAIDI	33
(2.1) Relación de costo, para el individuo t	51
(2.2) Factor de normalización de la función costo para el individuo t	51
(2.3) Relación de indicador SAIFI, para el individuo t.....	52
(2.4) Factor de normalización de la función del indicador SAIFI para el individuo t	52
(2.5) Relación de indicador SAIDI, para el individuo t	53
(2.6) Factor de normalización de la función del indicador SAIDI para el individuo t	53
(2.7) Función objetivo general	53
(2.8) Maximización de función objetivo	54
(2.9) Pesos de prioridad costos, SAIFI y SAIDI	54

INTRODUCCIÓN

Antecedentes la energía eléctrica por su creciente demanda es un servicio imprescindible y vital para el cumplimiento de las tareas diarias, pues toda actividad se desarrolla con dispositivos eléctricos y electrónicos que requieren de una fuente de energía de forma continua y de calidad. Las interrupciones de servicio eléctrico si bien, no se las puede eliminar por completo, debido a diferentes factores propios de la red, así como factores externos a ésta, se enfocan los esfuerzos en minimizar el nivel de afectación al usuario final. En tal virtud se plantea como línea de investigación las Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección para un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica en el sector industrial, comercial y residencial, con el desarrollo de una técnica de localización óptima en los sistemas eléctricos, para minimizar el tiempo de interrupciones y número clientes sin servicio.

Las empresas de distribución en general no están ajenas a la afectación por las interrupciones de servicio y en mayor escala en aquellas regiones tropicales con abundante vegetación sobre todo en las zonas rurales, dando como resultado el no cumplimiento de los índices de confiabilidad dentro de los períodos establecidos, de acuerdo a las normativas vigentes de cada territorio; para mitigar esta situación se busca el mejor equipamiento para ser instalado en los SED, siendo los dispositivos de protección que presentan mayores ventajas los denominados Reconectores Automáticos.

Los primeros reconectores son concebidos a mediados del siglo XX en Estados Unidos en reemplazo de los fusibles y relés de sobrecorriente como protección de SED, a cargo de Kyle Corporation, que lideró y comercializó una serie de dispositivos innovadores como: reconectores, seccionadores y conmutadores; para luego ser adquirida por Cooper Power Systems que formaba parte de la familia Eaton. Los reconectores iniciales eran dispositivos hidráulicos sumergidos en aceite con capacidad de transmisión de protección mecánica rudimentaria; se tuvo gran acogida y demanda de equipos para el uso en SED para detectar e interrumpir fallas transitorias. Con el surgimiento y aplicación de los relés de protección electrónicos basados en semiconductores por 1980, surgieron

equipos más sofisticados, denominados como RA, el medio aislante también fue reemplazado por SF₆, aire, cámara de vacío, aislamiento dieléctrico sólido.

Los avances tecnológicos hacen que los SED se comporten igualmente de forma dinámica, hoy en día es muy común hablar de redes inteligentes, debido a la introducción de nuevos componentes, que difieren de las redes convencionales, entre ellos se citan: GD, EA, DP como los RA. Los RA son dispositivos capaces de interrumpir el flujo de corriente bajo carga, al detectar una condición de falla, éstos equipos actualmente cuentan con apertura y cierre tri-polar (trifásicos), cuya operación se logra por medio de un equipo de control. Para obtener el mayor beneficio en la implementación de RA se busca la mejor alternativa: en tiempos de respuesta, vida útil y seguridad; para ello se debe determinar la ubicación óptima para su instalación.

La optimización se aplica tras la primera revolución industrial, aproximadamente 1855, en términos generales se trata de extraer lo mejor de cualquier cosa, con el menor esfuerzo, menor costo y menor tiempo posibles. Matemáticamente la mejor solución resulta ser el máximo o mínimo de las variables en tratamiento, sujetas a un conjunto de restricciones e incertezas. Mientras que en los sistemas energéticos se los define como el arte para dar solución a problemas y decidir la mejor alternativa de acuerdo a un grupo de criterios, en el menor tiempo, menor costo humano y materiales. Los primeros métodos de optimización se basan netamente en la matemática, con ello se resolvían los problemas numéricos, pero gracias a los avances de la tecnología y programas informáticos, para resolver tareas complejas, con un sin número de variables de decisión y a una gran velocidad de cálculo, se emplean los denominados *algoritmos metaheurísticos*, entendiéndose como métodos aproximados diseñados para dar solución a problemas de optimización. Las actividades modernas de planificación, explotación, operación y gestión de un SED, se los considera como problemas de optimización a corto, mediano o largo plazo.

Las empresas distribuidoras miden el rendimiento de su sistema eléctrico, en base a los índices de confiabilidad, donde se incluyen variables como la duración y la frecuencia de interrupciones, disponibilidad del servicio y el tiempo de respuesta;

estos aspectos son controlados por un ente regulador y en caso de incumplimiento se aplica un régimen sancionatorio. Con uno o varios de los índices se elige el criterio de optimización más acertado para la solución del problema.

El desarrollo del presente trabajo está constituido en tres capítulos (i) primero, abarca todo lo referente a la Fundamentación Teórica – Metodológica, que es la base a emplear durante el desarrollo de la solución al problema planteado, el estado de arte de la situación actual y propuestas anteriores en relación al tema. (ii) segundo, comprende el Desarrollo de la Propuesta, aplicando la metodología seleccionada. (iii) tercero, se presenta la Aplicación y/o Validación de la propuesta, se refiere a los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

Planteamiento del problema las empresas de distribución eléctrica se ven afectadas por las interrupciones de servicio del tipo no programadas, es decir aquellas que en cierto grado no se pueden prevenir, lo que da origen a inconvenientes como: duración de la salida de redes primarias y/o secundarias, energía no facturada, inconvenientes a los señores usuarios, tiempos significativos en la detección de fallas, no se puede discriminar entre fallas transitorias y permanentes.

Las interrupciones de servicio se ven reflejadas mensual y anualmente en los indicadores de confiabilidad y son reportados a los entes de control y regulación. De acuerdo a la normativa nacional aprobada por la ARCERNNR-002/20, desde el presente año se ingresa a un régimen sancionatorio para todas aquellas empresas distribuidoras que no cumplan con límites establecidos en cuanto al suministro del servicio eléctrico, siendo las principales causales de las interrupciones las ambientales, las perturbaciones en la red, las climáticas, los mantenimientos emergentes, terceros entre otros. Estos hechos hacen que los valores de frecuencia y duración de las interrupciones, disparen los indicadores SAIFI (FMIK) y SAIDI (TTIK), que junto a los Costos y Número de RA representan las variables dependientes de la investigación. Dentro de las causas ambientales se tiene: contaminación, fauna, incendios y vegetación; mientras que como causa de perturbación en la red se tiene: estabilidad del sistema, falla de equipamiento, otros. Son estos los principales problemas en los que se debe

priorizar las acciones pertinentes para el mejoramiento de la confiabilidad en los SED en general.

Considerando que las fallas presentadas en los SED la mayoría (70% - 80%) se tratan de eventos transitorios, los equipos de corte permiten reducir la carga desconectada y realizar maniobras de aislamiento de falla, reduciendo así los tiempos de restauración de servicio, si a esto le adicionamos equipos automáticos de re-cierre, los beneficios serán mayores; adicionalmente se debe considerar elaborar una metodología para conocer la mejor localización para instalación de los equipos de corte en los AMV del SED, dentro de la mencionada metodología se definen variables independientes como los pesos de prioridad, parámetros de entrada del método metaheurístico y parámetros de los componentes del SED; también se determinará el número de equipos a implementar, tomando en cuenta que su costo es bastante representativo y la coordinación de protecciones sería complicado al tener demasiados RA.

Generalmente las herramientas de software disponibles en las empresas distribuidoras a nivel nacional, son paquetes corporativos propietarios que requieren de licencia para su uso o un limitado número de accesos, lo que resulta un impedimento para realizar nuevas propuestas de mejora en el SED por cuenta propia, por ello se buscan alternativas entre los software libres, como soportes de ayuda para el desarrollo de la solución.

Formulación del problema para incrementar la confiabilidad en un AMV de un SED, se usará dispositivos de corte y protección llamados RA, lo que da paso a la interrogante de ¿Cuál debería ser la localización óptima de los reconectores en base a los criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución?

Objetivo General definir la localización óptima de reconectores con base a una mejora de la confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución.

Objetivos Específicos para encontrar una solución a la problemática planteada, se definió los siguientes propósitos:

- Documentar la información necesaria, en lo que se refiere a índices de confiabilidad de un SED y técnicas de optimización para la localización óptima de RA.
- Desarrollar la metodología propuesta en base a los índices de confiabilidad para la localización óptima de RA.
- Validar la metodología desarrollada en un circuito eléctrico de pequeño porte.
- Analizar los resultados obtenidos de la metodología propuesta.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos durante el desarrollo de la investigación y para cubrir uno a uno los objetivos trazados, se describe las tareas a ejecutarse en cada uno de los ítems de forma secuencial (ver Tabla 1).

Tabla 1: Tareas en relación a los objetivos específicos.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Recopilación de la fundamentación del estado del arte.	Determinar cuáles son las experiencias y avances en el tema de investigación.	Investigación de biblioteca física y virtual, artículos técnicos, ponencias, seminarios, etc.
	Elaboración de la fundamentación teórica necesaria para la investigación.	Aclarar el panorama de los conceptos y bases para la solución del problema.	Investigación de biblioteca física y virtual, artículos técnicos, ponencias, etc.
	Determinación de la fundamentación metodológica a llevar a cabo en la investigación.	Obtener el enfoque, tipo de investigación, técnicas y procedimientos empleados para la solución del problema.	Investigación de biblioteca física y virtual, artículos técnicos, ponencias, etc.
2	Desarrollo de la metodología elegida y selección del circuito de prueba.	Propuesta de solución para el mejoramiento de la confiabilidad.	Metodología propuesta.
	Desarrollo del algoritmo de interface y optimización definidas en la metodología.	Codificación de los procesos a lenguaje de máquina.	Software Matlab.
3	Desarrollo de programa de simulación de flujo de potencia.	Modelamiento del AMV en el SED.	Software OpenDSS.
	Aplicación de la metodología de optimización.	Mejora en los índices de confiabilidad.	Algoritmos genéticos.
4	Aplicación de los algoritmos desarrollados en el sistema IEEE de 12 barras.	Número y localización óptima de RA para el sistema IEEE de 12 barras.	Algoritmos de optimización, interface y simulación.
	Análisis del conjunto de soluciones obtenidas.	Definición de la mejor solución al problema.	Función objetivo e índices de confiabilidad.

Elaborado por autoría.

Justificación se debe a que la sociedad actual exige un servicio eléctrico continuo y de calidad, por ello las empresas distribuidoras se ven en la obligación de ir día a día implementando nuevas tecnologías y equipamiento en sus SED; que dicho sea de paso, es justamente en la etapa de Distribución dentro de un SEP, que se tiene el mayor porcentaje de fallas ya sean permanentes o transitorias; la opción de re-cierre es una excelente propuesta, lo que da paso a los conocidos RA. De acuerdo a la regulación ARCERNR-002/20 por cada índice de confiabilidad del servicio técnico incumplido, establece sanciones a la distribuidora.

La presente investigación es importante, debido a que permitirá comprender, comparar y evaluar los resultados obtenidos durante el desarrollo de la misma, al aplicar los criterios de confiabilidad, permitirá identificar los puntos más conflictivos, que a su vez tienen una alta injerencia en los indicadores de confiabilidad, permitiendo así determinar una localización óptima y número adecuado de RA, de tal forma que los costos sean mínimos en la inversión.

Una vez que sea puesto en práctica la localización óptima de reconectores en un AMV de prueba de la IEEE y comprobado su correcto funcionamiento, se podrá replicar el mismo estudio en los AMV de una empresa distribuidora, donde muchas ocasiones por falta de un profesional, tiempo, importancia en el tema; una vez que se dispone de estos equipos de re-cierre automático, se ha realizado su instalación solamente basada en experiencias u observaciones empíricas, con el presente estudio se preñen no solo poner en práctica en los nuevos reconectores, sino que también permitirá evaluar los RA ya existentes y comprobar que su localización sea la óptima.

Las variables de la función objetivo a maximizar en el proceso de optimización son los costos del equipo e instalación y los indicadores de confiabilidad SAIDI y SAIFI, en beneficio de los usuarios finales de cada distribuidora.

Hipótesis con la localización óptima de los reconectores en el alimentador de pequeño porte de un SED, se pretende una mejora de la confiabilidad al mínimo costo posible, siendo los beneficiarios la Distribuidora y el usuario final.

1 CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA - METODOLÓGICA

1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.

La presente sección contiene los antecedentes de investigación y estado del arte para la localización óptima de reconectores con criterios de confiabilidad en un AMV de un sistema eléctrico de distribución, se abordan varias temáticas para el desarrollo de la investigación y cumplir de forma exitosa con los objetivos trazados.

1.1.1 Sistema Eléctrico de Potencia.

Los sistemas eléctricos de potencia sin lugar a dudas son el mayor aporte del hombre a la sociedad, basta con imaginar hoy en día un mundo sin energía eléctrica. Sus inicios se remontan desde 1880 hasta 1930 como una etapa formativa, encargada de identificar y analizar los recursos naturales, así como evaluación de las diferentes condiciones. Posteriormente viene la fase evolutiva donde se crea el primer SEP, ubicada en Berlín por el año 1885, bajo los mismos principios que se tiene hoy en día: Generación, Transmisión y Distribución [1].

Llegando al SEP actual, al cual se lo define como un conjunto de instalaciones y dispositivos para generar, transmitir y distribuir energía eléctrica a los usuarios de una zona, región, ciudad o país. La función principal del SEP es suministrar a todos los usuarios con energía eléctrica a un mínimo costo posible, en la cantidad deseada y con un nivel aceptable de confiabilidad, seguridad y calidad. Los elementos que componen un SEP se muestran en la Figura 1, de éstos, el sistema de distribución se ha caracterizado tradicionalmente como el elemento menos confiable [2].

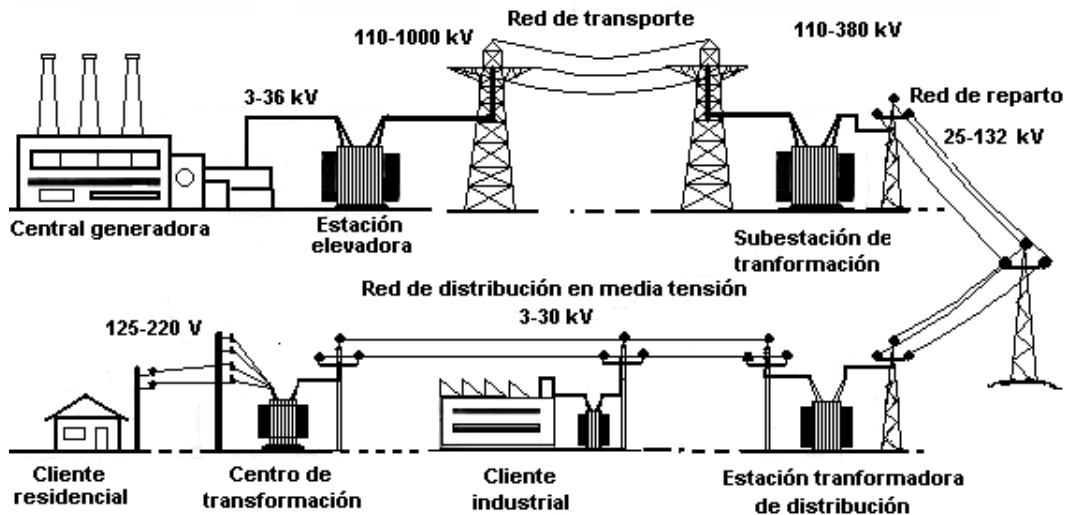


Figura 1: Componentes principales del Sistema Eléctrico de Potencia.
 Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Redelectrica2.png>

1.1.2 Sistema Eléctrico de Distribución.

Las S/E de distribución suministra energía eléctrica a uno o más AMV, donde la mayoría son radiales. El diagrama básico de un SED se muestra en la Figura 2, donde se ilustra los componentes principales de las S/E, muchos de los ellos son del tipo reparables [2]. El hecho que el SED sea el elemento menos confiable dentro del SEP, se debe a que las empresas de distribución a menudo tienen cientos, miles o incluso millones de componentes y clientes como se muestra en la Figura 3 [3].

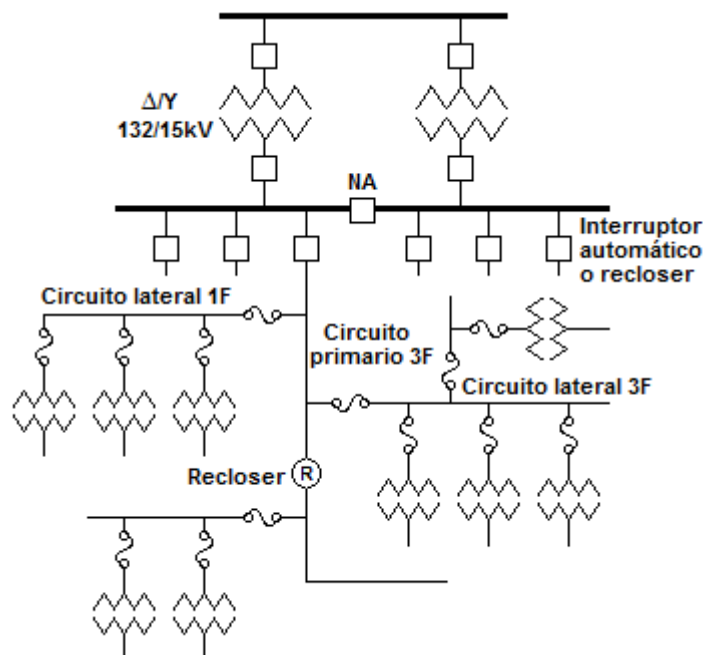


Figura 2: Componentes principales del Sistema Eléctrico de Distribución.
 Fuente: Luis Guerra Sánchez.

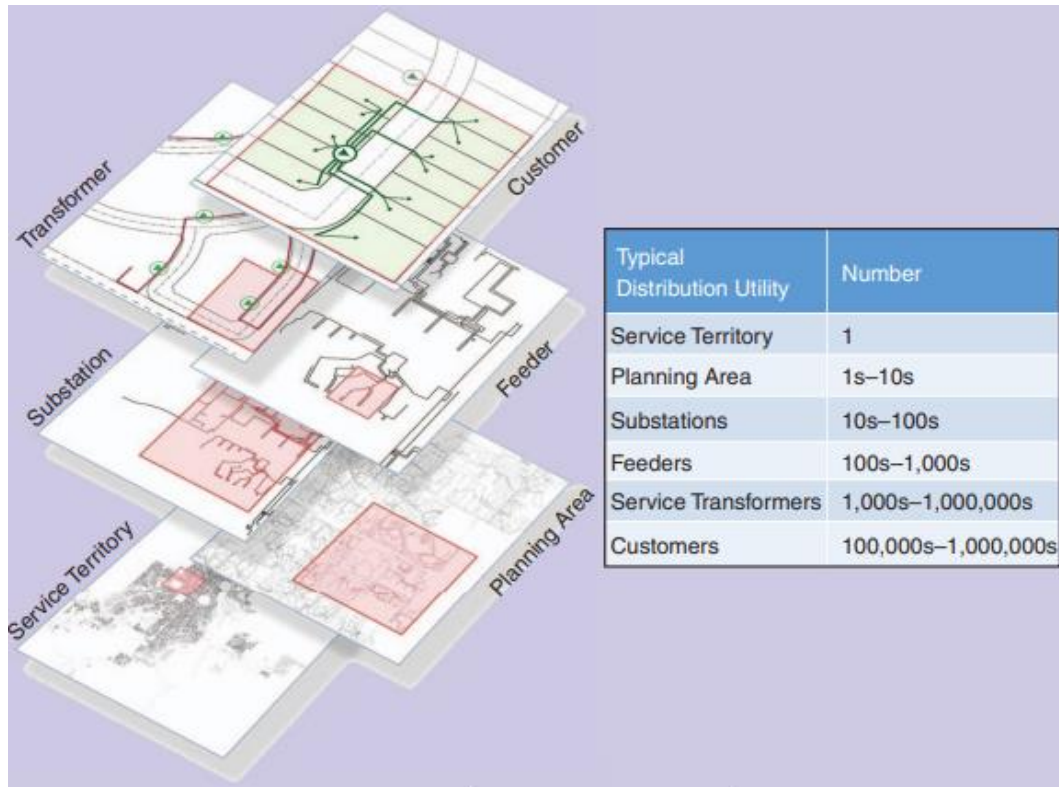


Figura 3: Extensa escala del Sistema Eléctrico de Distribución.

Fuente: IEEE Power & Energy Magazine.

1.1.3 Planificación del Sistema de Distribución.

El constante incremento de la demanda obliga a las empresas distribuidoras, a cumplir con su objetivo de entregar una energía eléctrica continua y estable con el menor costo posible, lo que se traduce en la instalación de nuevas S/E, AMV o su repotenciación y reconfiguraciones de la topología de red. La planificación de SED consiste en realizar un proceso metódico para proveer y satisfacer la demanda a futuro, por el hecho que se trata de un sistema con un alto número de variables, se transforma en un problema matemático complejo y para su solución se aplican técnicas computacionales avanzadas. Los métodos tradicionales insertan incertidumbre al modelo en análisis, provocando subdimensionamiento o sobredimensionamiento. Para una planificación considerando incertidumbre en la demanda se emplean técnicas de optimización, como por ejemplo algoritmos evolutivos, modelos difusos, algoritmos genéticos [4].

La planeación de SED se los puede realizar en dos entornos: regulado y liberalizado, en la Tabla 2 se aprecia las principales características de cada una [5].

Tabla 2: Planeación en sistemas eléctricos.

Entorno	Horizonte	Objetivo	Agente
Regulado	Corto Plazo [< 1]año	Abastecimiento de la demanda de corto plazo mediante los recursos de generación disponibles al menor costo. Extensiones y reconfiguraciones de red, instalación de equipos (reconectores, reguladores de voltaje), planes de mantenimiento. Administración operativa de los recursos disponibles (ej.: mantenimientos).	Empresa Integrada de Servicios Públicos
	Mediano Plazo [1 - 5]años	Repotenciación de subestaciones, construcción de nuevos AMV. Asegurar el suministro de energía eléctrica en el mediano plazo, teniendo en cuenta las limitaciones de las unidades de generación (ej.: obtención de combustible, factores climáticos)	Empresa Integrada de Servicios Públicos
	Largo Plazo [5 - 10]años	Realizar de manera eficiente las adiciones al sistema eléctrico para abastecer la demanda de largo plazo (ej.: incremento de la capacidad instalada, construcción de líneas de transmisión, cálculos eléctricos, planes de expansión)	Empresa Integrada de Servicios Públicos, Estado
Liberalizado	Corto Plazo [< 1]año	Abastecimiento de la demanda de corto plazo. Administración de portafolio. Extensiones y reconfiguraciones de red, instalación de equipos (reconectores, reguladores de voltaje), planes de mantenimiento. Administración operativa de los recursos disponibles (ej.: mantenimientos).	Operador del Sistema, Comercializadores, Generadores
	Mediano Plazo [1 - 5]años	Repotenciación de subestaciones, construcción de nuevos AMV. Análisis de riesgo y diseño de portafolio.	Operador del Sistema, Comercializadores, Generadores
	Largo Plazo [5 - 10]años	Análisis financiero de adiciones en capacidad al sistema, tanto a nivel de generación como de red. Evaluación del impacto al desempeño del sistema debido a nuevas instalaciones. Evaluación de las necesidades de largo plazo del sistema (cálculos eléctricos, planes de expansión).	Operador del Sistema, Generadores, Estado

Elaborado por David Cardona Vásquez.

1.1.4 Investigación Bibliográfica.

La revisión de la literatura científica con respecto a la planeación de corto plazo de sistemas de distribución, en lo que respecta a la localización de reconectores en AMV, se revisó y seleccionó aquella bibliografía que esté relacionada con el tema propuesto, teniendo en cuenta aspectos como: funciones objetivo, metodología desarrollada, técnicas de optimización aplicadas, componentes a

incorporar dentro de la red, restricciones, criterios para la optimización. A continuación se detalla un breve resumen de cada uno de los artículos considerados como aporte, dentro de la investigación.

Armando Leite da Silva y otros [6] desarrollan una propuesta para evaluar la confiabilidad de los sistemas de distribución considerando los reconectores automáticos, en el sistema brasileño. La metodología realiza la evaluación de una forma predictiva, el algoritmo desarrollado se basa en técnicas de enumeración de estados con modelos de Markov y teoría de conjuntos de corte mínimo. La implementación de reconectores en la red mejora tremendamente el rendimiento del sistema que se ve reflejado en los índices de confiabilidad: SAIFI, SAIDI, IAIFI e IAIDI. La interfaz desarrollada en Visual Basic tiene un ambiente amigable al usuario. La investigación propuesta permite emplear acciones preventivas, mejorando el desempeño de las redes, evitar pago de multas por incumplimientos y aumentar la satisfacción de usuario final.

La investigación desarrollada por Wanir Medeiros [7] indica que los reconectores son equipos de protección que reducen el tiempo de interrupción y aumentan la confiabilidad de los sistemas eléctricos, pues del 60% al 75% de las fallas son por causas transitorias. Se propone dotar a los reconectores discontinuados de la Compañía Eléctrica de Brasil de procesadores de señales digitales (DSP), tiene una alta capacidad de adquisición y procesamiento de datos. La aplicación desarrollada se lo hizo en lenguaje de programación Delphi, que permite modelar curvas basadas en IEEE, IEC y ABB.

El trabajo propuesto por Jamali y Shateri [8] se enfoca en la ubicación óptima de reconectores y seccionadores para reducir la energía no distribuida (NDE), también se consideran otras variables como costos de cierre de las cargas suministradas y el transformador de la subestación desde el punto de vista de calidad de la energía. El algoritmo propuesto es el método de numeración efectiva, para una red Iraní. El método se basa en equilibrar el costo de NDE contra los costos de instalación del reconector y seccionador, considerando el costo de cierre en transformadores de subestación y cargas suministradas.

En el trabajo de Lingfeng Wang y Chanan Singh [9] se observa que no se trata de analizar solo una red de distribución convencional, sino que a dicha red se le adiciona GD. Por tratarse de un problema complejo de localización óptima de RA con GD con restricciones a la confiabilidad, se propone como metodología de solución el Sistema de Colonia de Hormigas (ACS), es puesta a prueba en un alimentador con 69 barras, mediante un software desarrollado en Visual C++6.0, dando como resultado que para una capacidad dada de generación distribuida, la confiabilidad del SED aumenta con más reconectores instalados.

La propuesta de Amir Hisham y otros [10], para determinar la localización de reconectores automáticos en la red de distribución de Sabah Electricity (SESB) en Malasia, tomando en cuenta que las mayorías de fallas en distribución son temporales del 70% al 80%. Se plantea como función objetivo un análisis de costos, donde se incluirían el precio del RA y un estimado del nivel de pérdida de carga (VoLL). La evaluación de riesgos combina la probabilidad de falla, con el costo causado por la falla. Resultando una reducción de la inversión de RA y del riesgo de un escenario de interrupción.

El trabajo efectuado por Jichao Tian y otros [11] habla sobre la reconfiguración óptima de la formación mediante AG. Para la aplicación de AG es necesario el diseño de 4 componentes (i) población inicial, es un cromosoma que contiene información sobre la solución, se utiliza codificación de cadena binaria o decimal (ii) evaluación de la aptitud, es asignar un valor de aptitud de cada cromosoma, dependiendo lo cerca que esté de resolver el problema llegando así a la respuesta del problema deseado (iii) cruzamiento, viene hacer la recombinación (iv) mutación, pretende evitar que todas las soluciones de la población caigan en un óptimo local de solución.

Masoud Jafari y otros [12] desarrollan la metodología para determinar el número, capacidad y ubicación óptimos de GD y reconectores mediante el uso del proceso jerárquico de análisis (AHP) y algoritmo genético (AG). Para su evaluación se empleó una red de distribución IEEE modificada de 33 barras. La optimización se desarrolla en base a los índices de confiabilidad, calidad de energía y costos. El algoritmo propuesto es la combinación de tres: algoritmo de

búsqueda directa, AG y AHP; como primer paso y dependiendo del número de GD y reconectores, con la ayuda del AG se determina la ubicación y capacidad de GD y reconectores; luego por medio de AHP en función de la importancia de la confiabilidad, pérdidas, perfil de tensión y costo se determina el número óptimo de GD y reconectores.

El trabajo de Jaime Legerén y otros [13] explica sobre el tema de los algoritmos genéticos. Los métodos de análisis y modelización son empleados cuando se tiene un mayor grado de complejidad y el tamaño excede la capacidad natural de cálculo. Durante la década de los 60's empezaron a desarrollar algoritmos inspirados en la evolución dentro de la ingeniería, entre ellas se introdujo la Estrategia Evolutiva, Programación Evolutiva, Sistemas Digitales Adaptivos y posteriormente surgen los Algoritmos Genéticos.

El proyecto desarrollado por Daniel Pérez y otros [14] trata sobre un sistema inteligente para la gestión de reconectores y propuestas de maniobra en la red de distribución AES Electro Paulo. El sistema de gestión de interrupciones pretende aumentar el nivel de confiabilidad y eficiencia operativa. El módulo de apoyo de maniobra (MAM) es un software que actúa en base a los datos almacenados previos a una falla y propone una secuencia de maniobras para minimizar el impacto de la falla, el modulo está basado en la técnica de AG para buscar la mejor solución y una buena propuesta de maniobras para el operador.

La metodología para un sistema de distribución óptimo presentada por O.D. Montoya y otros [15] se basa en la planificación considerando reconectores automáticos para mejorar los índices de confiabilidad. La metodología está compuesta por dos fases (i) un algoritmo de recocido simulado (SA), donde se considera costos de instalación, mejoras y costos operativos (ii) estrategia de ubicación simultanea de reconectores RNC y RNA para transferencias con determinadas condiciones operativas, la resolución está a cargo del algoritmo genético no dominado NSGA II. La propuesta es evaluada en un esquema de 54 nodos; la FO es minimizar costos de instalación de tramos de red nuevos o existentes, instalación de subestaciones nuevas o existentes y costos operativos asociado a pérdidas de energía.

El trabajo de A. Álzate y otros [16] propone la ubicación óptima de reconectores considerando la confiabilidad en los canales de comunicación, como técnica de optimización multiobjetivo se utiliza Micro-AG por su fácil implementación y computo eficiente. Dentro del estudio se abarca el aislamiento de fallas (RNC) y la transferencia de carga (RNA) considerando la confiabilidad de sus canales de comunicación. Dentro de la FO se considera (a) minimizar los costos de reconectores y canales de comunicación; (b) confiabilidad en relación de la ENS y la probabilidad de funcionamiento de los canales de comunicación; (c) capacidad de carga límite para transferencias; (d) variación máxima del perfil de voltaje; (e) asegurar que en cada sección de red exista un único reconector y canal de comunicación; y (f) cálculo de ENS. La metodología desarrollada es Micro-AG. Del resultado conseguido se tiene que los canales de comunicación de fibra óptica y GPRS minimizan en mayor grado la ENS; mientras que los RNC tienden al uso de canales GPRS y los RNA tienden a usar fibra óptica y radio frecuencia.

En el proyecto de Michael Costa y otros [17] se refiere a la búsqueda de fallas en el sistema de distribución usando reconectores trifásicos en Inglaterra. Este nuevo método subdivide los alimentadores de distribución empleando interruptores inteligentes, reduciendo el número de clientes afectados en cada corte, la introducción de interruptores inteligentes no supone un exhaustivo estudio de protecciones o una completa modificación de la configuración de protecciones, el control se basa en voltajes y corrientes del sistema.

El presente trabajo de Miguel Velásquez y otros [18] trata sobre la planificación multiobjetivo de reconectores basados en sistemas de protección de alimentadores mejorados con GD, para ello se implementa RNC, mientras que la optimización multiobjetivo pretende reducir el SAIDI, SAIFI y los costos del sistema; se aplica el algoritmo de clasificación de evolución diferencial (NSDE), que se encuentra desarrollado en Matlab. Como entorno de co-simulación se tiene el DigSILENT para el modelado del sistema de energía. Los resultados arrojaron tres escenarios (a) una extrema que se concentra en minimizar los costos (b) la más equilibrada que satisfaga el conjunto de objetivos (c) otra extrema que sobrepasa la confiabilidad esperada.

En el estudio presentado por Qiu Qin y Eva Wu [19] se presenta la asignación y ubicación de reconectores en un sistema de distribución rural. El esquema de asignación se concentró en minimizar el SAIFI. La demostración de la asignación y ubicación se lo realiza en el sistema de pruebas Roy Billinton (RBTS), que consiste en una red 6 buses. Se recomienda realizar en dos etapas (a) división del sistema en áreas y asignación de dispositivos a cada área independiente de la topología de red, sino únicamente basados en información estadística (b) la ubicación se determina utilizando criterios de confiabilidad específicos, en términos de SAIFI y CAIDI.

El trabajo desarrollado por Juan Gallego y otros [20] muestra la ubicación óptima de reconectores y fusibles en sistemas de distribución, para mejorar los índices de confiabilidad asociados a la frecuencia en las fallas transitorias y permanentes. Al trabajar con RA y fusibles se debe coordinar estos 2 elementos, bajo los esquemas: “salva fusible” y “funde fusible”, generando 2 modelos matemáticos no lineales, el primer minimiza el índice SAIFI y el segundo minimiza el índice MAIFI. Las metodologías seleccionadas son (i) optimizador comercial GAMS (ii) AG de Chu & Beasley. Las restricciones consideradas en el modelamiento son: dispositivo en perfecto estado y ubicado en las 3 fases, fallas excluyentes e independientes y topología radial e invariante. Los resultados indican que la técnica AG Chu & Beasley brinda una mejor y mayor cantidad de soluciones a comparación del software comercial GAMS.

La investigación a cargo de Mario Ríos [21] sobre la localización óptima de RNA para transferencia de carga, indica que los índices más comunes que cuantifican la confiabilidad están relacionados con la frecuencia y duración de las fallas. Se trata de un problema de optimización combinatorial, debido a la extensión de las redes, número de ramales y diversidad de la carga. El objetivo es elevar el nivel de disponibilidad de servicio eléctrico y minimizar los costos fijos, combinando los RNC y RNA. Las restricciones presentes en la investigación son capacidad de AMV, regulación de tensión, capacidad de S/E, número de RA. El procedimiento consiste en definir los parámetros de entrada y áreas de operación para aplicar el algoritmo NSGA II y una vez concluido se verifica las respuestas obtenidas en el frente de Pareto, finalmente de las múltiples posibles soluciones se las normaliza

de acuerdo al criterio de máx / mín, encontrando la mejor solución que satisface a la función objetivo.

La investigación desarrollada por Erasmus y Naidoo [22] trata sobre los sistemas de distribución inteligente y optimización del número y ubicación de reconectores para minimizar la avería de equipamiento, en la red eléctrica de Sudáfrica. La implementación y optimización llevada a cabo basándose en la confiabilidad y costos; considerando aspectos como seguridad del equipo y disparo de grandes cargas. El algoritmo de optimización tiene como función objetivo minimizar cinco factores: avería o daño, costo de inversión, riesgo para el cliente, riesgo para la carga y límite de activación (pick-up). De los resultados obtenidos se señala que los parámetros de ponderación para cada factor son valiosos, lo que permite priorizar ciertos factores sobre otros.

G. Siva y otros [23] desarrollaron la investigación sobre la colocación de GD y reconectores en el sistema de distribución considerando la confiabilidad. La confiabilidad se analiza identificando la energía no suministrada (ENS) en el sistema, mientras que la GD reduce requerimientos de la subestación y satisface la demanda de carga. Para la ubicación óptima de GD y reconectores se usa métodos analíticos basados en mínima pérdida de potencia y mínima ENS. El dimensionamiento óptimo de GD se realiza a través de la técnica de optimización de enjambre de partículas (PSO), la FO es minimizar la pérdida de potencia. La propuesta es validada en una red radial de distribución IEEE de 33 barras.

La investigación de Anton y Dmitry [24] busca un mejoramiento del indicador SAIFI para incrementar la confiabilidad en el sistema de distribución a base de la ubicación óptima de reconectores, se emplea algoritmos genéticos para encontrar el valor óptimo del índice SAIFI; está diseñado tanto para red radial o anillo y con varias fuentes de suministro de energía en Rusia. La evaluación se la realiza en un esquema de 37 nodos de la IEEE, para lo cual se le adiciona una fuente de energía adicional, el algoritmo se lo desarrolla en Matlab.

La presentación de L. Grisales y otros [25] radica en la planificación y operación óptimas de los sistemas de distribución considerando los recursos energéticos distribuidos y reconectores automáticos, dentro de un contexto de redes

inteligentes; como variables de decisión se tiene la ubicación y el tamaño de tecnologías (GD, EA, DP, RA). La metodología seleccionada consta de tres etapas (i) AG especializado para la localización de dispositivos (ii) algoritmo de optimización de enjambre de partículas para dimensionar los elementos (iii) AG de clasificación no dominado para solucionar el problema objetivo relacionado a la ubicación de reconectores. La funcionalidad se verifica en un sistema de 102 nodos. La metodología propuesta fue desarrollada en el software Matlab y para evaluar las condiciones de flujo de carga se empleó la herramienta MatPower.

Arash Zeinalzadeh y otros [26] analizan la localización óptima multiobjetivo de reconectores y seccionadores en alimentadores de distribución. El algoritmo implementado corresponde a Optimización Multi-objetivo por Enjambre de Partículas (MOPSO), que nos permite conocer el número y ubicación de reconectores y seccionadores a ser implementados en la red, la evaluación del método se realiza en una red estándar de 85 nodos. Los factores considerados en la primera FO son costos y duración de la interrupción, topología de la red, variación de carga, tasas de falla, tiempo de despeje; mientras que la segunda FO considera mejorar los índices de confiabilidad y finalmente como tercera FO se consideran los costos de los dispositivos de conmutación.

El proyecto desarrollado por Hira Sultan y otros [27] explica la manera de mejorar la confiabilidad en un sistema radial de distribución con la colocación de reconectores, maximizando de esta forma la satisfacción del cliente. Se aplica el método en un sistema radial de 13 nodos, la evaluación del método en el cálculo y comparación de los índices de confiabilidad antes y después de la instalación del reconector. Para su desarrollo se usa el método de matriz Inyección de Bus a Corriente de Ramal (BIBC), con la colocación óptima del reconector la tasa de falla y costo total de interrupción (TIC) disminuirán. La FO es maximizar los ingresos a la empresa con la minimización del costo de interrupción al cliente y aumento de la energía extra suministrada al cliente mientras se reduce los costos de inversión. Para la simulación se emplea el software Matlab.

Hernán Santana [28] dentro de su propuesta analiza el impacto por evento de subestación orientado a objetos genérico (R-GOOSE) en un reconector. R-

GOOSE es una forma simplificada de comunicación con los dispositivos electrónicos inteligentes (IED's) dentro de la automatización del sistema de energía y así llegar a las redes inteligentes. Su rol actual es completamente diferente al de un equipo de maniobra aislado, el equipo debe estar integrado a la red de área amplia (WAN) y así pertenecer al sistema distribuido de automatización (DAS) o al DAPS.

El trabajo de S. Redrobán Amores [29] expone la reconfiguración óptima multiobjetivo de alimentadores primarios como una estrategia de planificación para el mejoramiento del desempeño operativo de los SED, describe una metodología para minimizar las pérdidas de potencia y mejorar los perfiles de voltaje, considerando restricciones de protección como son las de selectividad, sensibilidad y velocidad de respuestas. Para resolver este problema combinatorial, se emplea la técnica metaheurística de AG con un enfoque basado en la teoría de grafos y matroides. La metodología se desarrolla en el lenguaje de programación Python en interacción con el software Cymdist. Para la validación se emplea la red de prueba IEEE 33 nodos. Los resultados obtenidos evidencian la eficacia de la metodología en la disminución de las pérdidas de potencia y mejora de los perfiles de voltaje cumpliendo con los criterios de protecciones de la red de distribución, así también la aplicabilidad en sistemas reales con requerimientos y tiempos computacionales bajos.

1.1.5 Discusión.

La electricidad desde su aparición y la colaboración de varios inventores, con el transcurso del tiempo se han dado paso a nuevas invenciones como los conductores, motor, generador, transmisión eléctrica, etc.; en base a todos estos elementos se fueron formulando principios y leyes que definen el comportamiento de la electricidad. A continuación se desarrolla la discusión del estado del arte, respecto a los artículos de la metodología a ser considerada en el presente trabajo.

El desarrollo industrial y la globalización de los mercados, establecen políticas más estrictas a las empresas distribuidoras, con el objetivo de incrementar la confiabilidad en sus sistemas. Para conseguir la mejora de servicios se requiere de la utilización de metodologías eficientes de planificación al menor costo posible,

lo que permitirá responder de manera eficaz en la operación ante cualquier escenario presentado [15]. La planificación con sus tres etapas permite a las empresas distribuidoras desarrollar los planes de expansión, en la etapa de largo plazo con un horizonte de 5 a 10 años, la etapa de mediano plazo comprendida en un período de 1 a 5 años y la etapa de corto plazo tiene como horizonte todas aquellas actividades menores a un año [30].

Para resolver los problemas de planificación de SED que son originadas por la aparición de unas cargas o incremento de las existentes [15], se propone determinar la configuración óptima del SED con el uso del algoritmo de Recocido Simulado, obteniendo una minimización en los costes de inversión y operación, la metodología también brinda flexibilidad para introducir una gran variedad de restricciones de voltaje, corriente y costos. La primera ecuación planteada considera costos de red nueva y existente, instalación de subestaciones nuevas y existentes y costos operativos asociados a las pérdidas técnicas; en una segunda ecuación se hace balance de energía en cada nodo y las últimas ecuaciones buscan garantizar el límite de cargabilidad en cada segmento. A diferencia de la propuesta presentada en este artículo, que evalúa la metodología en una red de 54 nodos; en el presente trabajo se desarrollara en una red real, que puede adaptarse a sistemas de n número de barras.

Actualmente la automatización de los SED han ganado una gran importancia, con el objetivo de conseguir un alto nivel de confiabilidad, sin embargo esto produce una controversia porque el hecho que el sistema sea más confiable involucra un alto costo de inversión [18]. La metodología que pretende cumplir con los objetivos es una optimización multiobjetivo de Pareto, es decir si no existe una solución factible, en lugar de X que mejora la función objetivo sin afectar al resto, entonces X es el óptimo de Pareto. La planificación del sistema está caracterizada por dar una respuesta a minimizar el SAIFI, SAIDI y costos, con la introducción de dispositivos de protección para cumplir con dos funcionalidades como son el aislamiento de fallas y formación de islas eléctricas en conjunto con la generación distribuida, siendo parte de las redes inteligentes. En Ecuador, la inserción de redes inteligentes es una tecnología en creciente desarrollo, por ello con la

localización óptima de RA, se aportará en el tema de automatización de redes de distribución.

La metodología para planificación y operación de SED en el entorno de redes inteligentes [25], involucra la integración de nuevas tecnologías de GD, permitiendo una mayor automatización del SED, obteniendo ventajas como reducción de la energía y pérdidas de potencia activa y mejora en el perfil de voltaje y calidad de servicio. Para obtener una mayor robustez, autonomía y confiabilidad en el sistema, se considera en la metodología una optimización por etapas, de acuerdo con los sistemas de recursos distribuidos y equipos de protección que se tenga pensado agregar al SED. Desarrollar una metodología clara y práctica en lo que se refiere a ubicación de los RA, para que a medida que se introduzca recursos distribuidos en la red convencional de distribución, se cuente con una ruta a seguir según las particularidades de cada sistema.

Para realizar los procesos de optimización para la ubicación de equipos se puede realizar en base a varios parámetros, por ejemplo un parámetro poco común resulta la confiabilidad de los canales de comunicación para la ubicación óptima de RA para aislamiento de fallas y transferencia de cargas [16], como técnica de optimización multiobjetivo se ha considerado la Micro-AG. La localización óptima se basa en la probabilidad de operación de los canales de comunicación de los RA, pero para muchos medios, que se pretenda implementar sobre todo en el ámbito nacional, no resulta tan viable, debido a que las comunicaciones remotas no brindan al momento las garantías de caso, por ello se sugiere que las restricciones de la función objetivo considere los índices de confiabilidad.

Las metodologías de optimización para introducir nuevos equipos en la red, por lo general buscan satisfacer objetivos similares, sin embargo existen sus excepciones como adicionar a las funciones objetivos la reducción de daños en los equipos y riesgo de disparo debido a cargas considerables [22], permitiendo un mayor énfasis en la seguridad del sistema. El algoritmo de optimización está conformado por cinco factores como son: factor de daño, costo de inversión, riesgo de interrupción de clientes, riesgo de interrupción de carga considerables y límite pick-up; para minimizar la FO se utilizó la técnica de AG, debido a que permite

explorar en grandes espacios de búsqueda con muchos máximos y mínimos locales. De las simulaciones realizadas se puntualiza que la ponderación es muy importante, debido a que si a los factores se les da la misma ponderación, la salida casi no varía con respecto a la función de transferencia original.

Por su naturaleza propia, los AMV están sujetos a dispersión geográfica, por lo que se presentan interrupciones de servicio debido a climas adversos y crecimiento de la vegetación, para enfrentar esta situación es común el uso de dispositivos de protección y seccionamiento entre ellos los reconectores, seccionalizadores y seccionadores, minimizando el área de interrupción cuando se presenta una interrupción, lo que se traduce en un aumento de la confiabilidad del sistema [26]. Para tal efecto se propone la optimización de enjambre de partículas multiobjetivo para localizar los RA y seccionalizadores. El algoritmo de enjambre de partículas si bien permite obtener los objetivos propuestos, para el desarrollo de la presente investigación se utiliza la metodología de algoritmos genéticos, debido a que se adecúa a la complejidad y estructura del problema, además se cuenta con el estado del arte de trabajos que utilizan esta herramienta de optimización, para solucionar la localización de equipos en los SED.

La ubicación óptima de RA para transferencia de carga [21] permite el restablecimiento de carga en un AMV con falla permanente, de forma ágil a través de otros AMV vecinos, para ello es importante considerar aspectos como: cargabilidad de los AMV, regulación de voltaje, capacidad de subestaciones, número máximo de RA. Como técnica de solución se aplica el algoritmo NSGA-II, ya que contempla la mejora de la solución en su proceso de ejecución. En la presente propuesta se utilizará RNC para determinar su localización óptima, en vista, que una de las características principales de un AMV de un SED es su radialidad.

La ubicación de dispositivos de protección en el SED corresponde a un problema combinatorio de alta complejidad matemática [20], obteniendo un tipo no lineal binario y de característica polinómica. Como técnica de solución se emplea AG Chu & Beasley, que es ampliamente utilizado para localizar dispositivos de protección en SED radiales con resultados exitosos. Una ventaja de desarrollar

técnicas metaheurísticas con respecto a aplicar software del área de planificación o del área comercial, es que durante el desarrollo se obtiene un conjunto de posibles escenarios, quedando a criterio del usuario los requerimientos deseados para hallar la mejor solución. Software propietarios como DigSILENT o GAMS siempre serán un obstáculo al exigir una licencia para su uso, pues bien, una excelente alternativa para cumplir con las metas propuestas es utilizar software libre como OpenDSS, que hace posible el modelado, diseño y planificación de los SED de manera más accesible, con la interacción en conjunto de Matlab.

Finalmente, de la investigación bibliográfica realizada se ha seleccionado un total de diez trabajos considerados relevantes, para el desarrollo de la localización de reconectores con base en índices de confiabilidad en un AMV de un SED, tomando en cuenta aquella literatura especializada y que ha sido validada en redes IEEE de pequeño porte y redes reales en diferentes países, permitiendo definir la metodología a seguir y la técnica de optimización más adecuada, que satisfaga los requerimientos planteados. A continuación la Tabla 3 está conformada en primera instancia por el año de presentación de la bibliografía. Como segundo punto se cita al o los autores responsables del desarrollo de la investigación de cuarto nivel en adelante. Seguidamente se tiene el título del proyecto que tiene una estrecha relación con el presente trabajo de investigación. En los objetivos principales se detalla las funciones objetivo planteadas, minimizando o mejorando ciertas variables de acuerdo a los requerimientos de cada trabajo. Posteriormente se presentan las técnicas de optimización utilizadas, así como las herramientas computacionales aplicadas, para dar solución a la problemática planteada. Las particularidades describen hechos propios de cada investigación. Finalmente la contribución al trabajo, permite disponer de fundamentos de ingeniería y herramientas de optimización, que serán la base para el desarrollo de la metodología planteada en este proyecto.

Tabla 3: Bibliografía base para el desarrollo de la investigación.

Año	Autor	Título	Objetivo Principal	Herramienta Computacional Técnica de Optimización	Particularidades	Contribución al Trabajo
2014	O. D. Montoya A. Grajales R. A. Hincapié M. Granada R. A. Gallego	Metodología para la planificación óptima de red de distribución teniendo en cuenta los reconectores automáticos para mejorar los índices de confiabilidad.	Minimizar costos de instalación de tramos de red nuevos o existentes, instalación de subestaciones nuevas o existentes y costos operativos asociado a pérdidas de energía.	Usa algoritmo de Recocido Simulado (SA), para la configuración de red y algoritmo genético no dominado (NSGA II) para ubicación de reconector.	Introduce el problema planificación del sistema de distribución (DSP), que proviene de la aparición de nuevas cargas o incremento de existentes, para abastecer los requisitos de la demanda.	Funcionalidades del reconector, normalmente cerrado para aislamiento de fallas y normalmente abierto para restauración de servicio (transferencia).
2015	A. Álzate O. D. Montoya R. A. Hincapié M. Granada	Ubicación óptima de reconectores en sistemas de distribución considerando la confiabilidad en los canales de comunicación.	Minimizar los costos de inversión de reconectores y canales comunicación.	Técnica de solución de objetivos múltiples MICRO-AG	Emplea el concepto de áreas operativas, que permiten reducir la simulación de contingencias y mejoran los tiempos de cálculo.	Estructura detallada del modelo matemático, permitiendo el desarrollo de la solución.
2015	Miguel A. Velásquez Nicanor Quijano Ángela I. Cadena	Planificación multiobjetivo de sistemas de protección basados en reconectores de alimentadores mejorados con generación distribuida (GD).	Minimizar el SAIDI, SAIFI y los costos del sistema.	Aplica el algoritmo de Clasificación de Evolución Diferencial (NSDE), desarrollado en Matlab. Para el flujo de potencia se utiliza DigSILENT.	La generación distribuida (GD) en la SED, da paso a las smart grids, debido a la oportunidad de operar en islas ante fallas de la fuente principal.	Desarrollo del algoritmo evolutivo en el software Matlab para mejorar la confiabilidad del sistema.
2016	Mario Ríos Giraldo	Localización Óptima de Reconectores Normalmente Abiertos para Transferencia de Carga.	Elevar el nivel de disponibilidad de servicio eléctrico y minimizar los costos fijos.	Técnica de optimización de algoritmo genético no dominado (NSGA II).	Parte del hecho que en la red existe RNC y van a trabajar coordinadamente con los RNA. Presenta una explicación detallada sobre AG así como el algoritmo NSGA II.	Descripción de algoritmos genéticos y algoritmos genéticos no dominados, aplicando a los reconectores.
2016	Juan Gallego Oscar Montoya Ricardo Hincapié Mauricio Granada	Ubicación óptima de reconectores y fusibles en sistemas de distribución.	Minimizar el índice SAIFI y minimizar el índice MAIFI	Técnicas de solución optimizador comercial GAMS y algoritmo genético de Chu & Beasley desarrollado en Matlab.	Verificación de la validez, aplicando 2 metodologías diferentes.	Algoritmo genético de Chu & Beasley implementado en Matlab, minimizando la frecuencia de interrupciones.

Año	Autor	Título	Objetivo Principal	Herramienta Computacional Técnica de Optimización	Particularidades	Contribución al Trabajo
2017	Ewald Erasmus Raj Naidoo	Distribución inteligente y optimización del número y la posición de los reconectores para minimizar los daños a los equipos.	Mayor seguridad al sistema, una mejora de la vida útil del equipamiento del alimentador. Sin dejar a un lado la confiabilidad y costos.	El modelo aplica la técnica de algoritmo genético.	Modifica la función objetivo típica y se incluye un factor de daño y límite de arranque, adicional a costos, riesgos de clientes y cargas.	Conocimiento de 6 diferentes métodos de optimización para determinar la cantidad y ubicación de equipos del sistema.
2017	G. Siva Priya J.Senthil Kumar S.Charles Raja P.Venkatesh	Colocación de generadores distribuidos y reconectores en el sistema de distribución teniendo en cuenta la confiabilidad.	Minimizar las pérdidas totales de energía real y mejorar la confiabilidad.	Localización utiliza métodos analíticos basados en mínima pérdida de potencia y mínima ENS. Para el dimensionamiento de DG se usa optimización de enjambre de partículas (PSO).	El flujo de potencia para obtener la pérdida total de energía emplea la técnica de barrido forward/backward.	Diagrama de flujo detallado del algoritmo implementado. Presentación clara de resultados obtenidos.
2018	L. F. Grisales O. D. Montoya A. Grajales R. A. Hincapié M. Granada	Planificación y operación óptimas de los sistemas de distribución teniendo en cuenta los recursos energéticos distribuidos y los reconectores automáticos.	Disminuir las pérdidas, mejoramiento de los perfiles de tensión y reducción de la energía no servida.	La metodología usa software Matlab. Se emplea técnicas heurísticas para GD y EA; mientras que para NCR y NOR se usa NSGA II.	Algoritmos heurísticos no siempre garantizan la mejor solución, sin embargo su alta velocidad de convergencia resultan muy útiles en la práctica.	Algoritmos heurísticos con alta velocidad de cómputo, por el mismo hecho que están diseñados en etapas de aplicación secuenciales.
2019	Arash Zeinalzadeh Abouzar Estebarsari Alireza Bahmanyar	Colocación Óptima Multiobjetivo del Reconector y Seccionalizador en alimentadores de distribución eléctrica.	Incrementar la confiabilidad del sistema y minimizar las interrupciones y los costos de inversión.	Algoritmo implementado Optimización Multi-objetivo por Enjambre de Partículas (MOPSO)	Para determinar la solución final del conjunto de soluciones óptimas se emplea lo que se conoce como Frente de Pareto.	Localización en conjunto de reconectores y seccionalizadores a un mínimo costo y con servicio confiable.
2019	Hira Sultan Salman Khan Shahid Junaid Ansari Mustufa Sarwar Afroz Alam Mohammad Zaid	Mejora de la confiabilidad de un sistema de distribución radial con la colocación de un reconector.	Maximizar los ingresos a la empresa mediante la colocación de reconector en la ubicación óptima con una inversión y unos costes de interrupción mínimos.	Se usa el método de matriz Inyección de Bus a Corriente de Ramal (BIBC). La simulación se la hace en el software Matlab.	La metodología para la comparación de resultados, introduce el concepto de Costo Total de la Interrupción (TIC), relacionada con el costo por una falla temporal y una permanente.	Modelo de cálculo para los índices de confiabilidad, que permiten evaluar el estado del sistema de distribución.

Elaborado por Autoría.

1.2 Fundamentación Teórica.

Una vez que se ha explorado los alcances de investigaciones predecesoras, éstas permiten entender de donde viene el problema planteado y que mejoras se busca obtener con la propuesta de solución. Para ello a continuación se describe ciertos aspectos que son importantes y permiten estructurar de forma ordenada y sistemática el camino que ayuden a conseguir los objetivos trazados.

1.2.1 Reconectores Automáticos.

Es un DP capaz de detectar una sobrecorriente, interrumpirla y reconectar automáticamente para reenergizar la red eléctrica. Está dotado de un control que le permite realizar varias reconexiones sucesivas, pudiendo además, variar el intervalo y la secuencia de estas reconexiones [31]. La función de reconexión permite que una falla transitoria no se convierta en una falla permanente, logrando elevar la continuidad del suministro. Mientras las aplicaciones más frecuentes son protección de redes de distribución en MV y optimización de continuidad de suministro [32].

Los RA tiene una secuencia de operación que permite programar para un máximo de 3 reconexiones y 4 aperturas, dependiendo del estudio de coordinación, donde los tiempos de apertura se rigen a las curvas de tiempo - corriente en operación rápida y operación retardada. En la Figura 4 se representa la secuencia típica de la operación del reconector, donde se muestran los tres intervalos de reconexión, así como el uso de las curvas durante la desconexión del dispositivo [31].

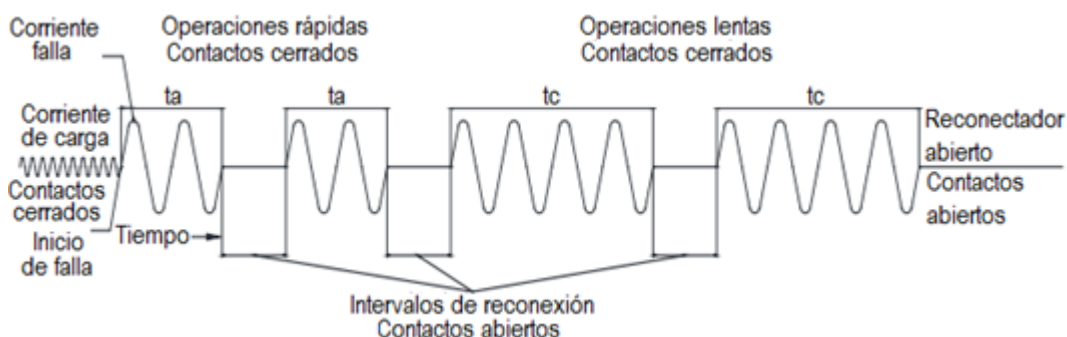


Figura 4: Secuencia de operación típica de un reconector.

Fuente: Autoría.

1.2.2 Optimización.

La investigación operativa se define como la aplicación de métodos científicos para el incremento de la efectividad en las operaciones, decisiones y gestión. Una parte relevante de la investigación operativa es la Optimización que se presentan de múltiples formas: lineal, no lineal, entera, estocástica, multiobjetivo. Una red óptima es aquella que presenta un nivel de tensión dentro de los márgenes establecidos, mínimo costo total (en lo se refiere a inversión, mantenimiento y pérdidas) y buena continuidad de servicio. Un problema de optimización generalmente está compuesto por tres elementos [33]:

- a) *Restricciones*, representan un conjunto de relaciones que ciertas variables están obligadas a satisfacer, vienen representadas por medio de ecuaciones o inecuaciones. Para resolver el problema de localización de reconectores se determina restricciones relacionadas con: la primera Ley de Kirchhoff (desbalance de carga, sobrecargas), la segunda Ley de Kirchhoff (caída y perfiles de voltaje), la topología de la red (radialidad), costos de inversión, los índices de confiabilidad (SAIDI y SAIFI), la coordinación de protecciones, el número de RA.
- b) *Función Objetivo*, son las soluciones factibles que permiten verificar las restricciones, bajo un cierto criterio que permita ordenar las soluciones y que valore cuantitativamente la calidad de la solución. Del estado del arte sobre la localización óptima de reconectores se cubre el cumplimiento de criterios en lo que se refiere a sobrecargas, caídas de voltaje, radialidad de la red, índices de confiabilidad, coordinación de protecciones, número de RA y costos de inversión.
- c) *Variables*, son las situaciones y decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo, se las puede clasificar como variables dependientes (auxiliares o de estado) y variables independientes (principales o de control), a pesar que matemáticamente son iguales.

1.2.3 Métodos de Optimización.

En la actualidad existe una gran cantidad de métodos, unos con mejores resultados que otros de acuerdo a los objetivos iniciales. Una clasificación de estos métodos

es la que se divide entre métodos tradicionales o deterministas y métodos metaheurísticos; estas técnicas tienen como objetivo optimizar las funciones que están sujetas a determinadas restricciones.

1.2.3.1 Métodos Tradicionales o Deterministas.

Estos métodos encuentran la solución deseada de una forma determinística, o en otras palabras libre de riesgos. Requieren de una definición analítica del problema y necesita definir de forma rigurosa las relaciones de dependencia de la función objetivo, no ingresa instrucciones que utilice números aleatorios para tomar la decisión de procesamiento. Sus principales campos de acción son finanzas, problemas de asignación, diseño de sistemas y estructuras. Estos métodos a su vez tiene varios tipos como se muestra en el Figura 5 [34].

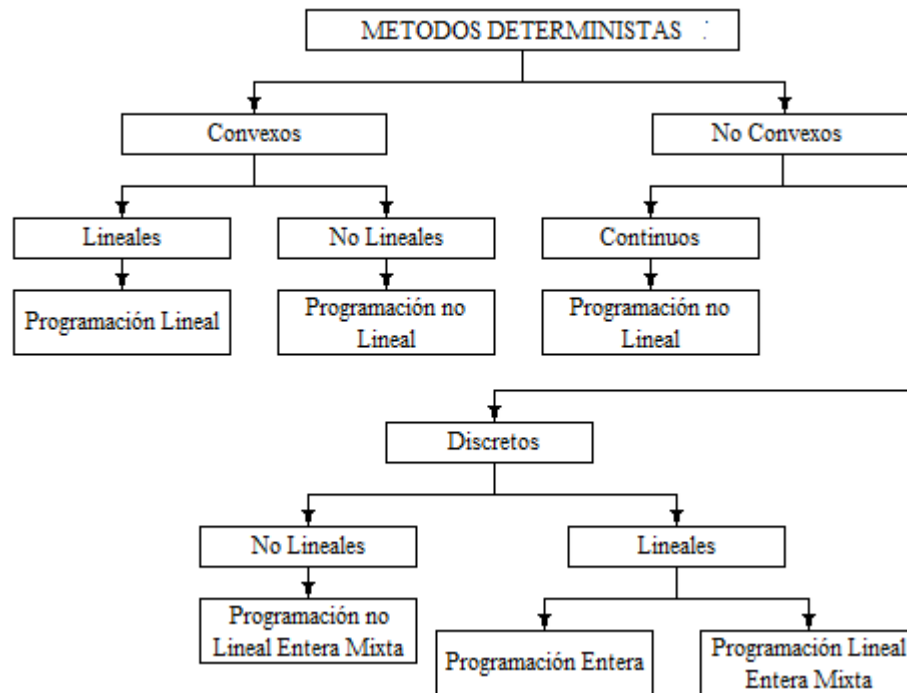


Figura 5: Tipos de problemas de optimización mediante técnicas deterministas.

Fuente: María Macías Infantes

1.2.3.2 Métodos Metaheurísticos.

Los algoritmos metaheurísticos se consideran como algoritmos aproximados de optimización y búsqueda de propósito general, consiste en procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada de búsqueda, combinando inteligentemente conceptos para explorar adecuadamente el espacio de investigación. Las ventajas que presenta son: algoritmos de propósito general,

aplicación exitosa en la práctica, fácil implementación y fácilmente paralelizables [35]. Los algoritmos metaheurísticos se los considera como Algoritmos Inteligentes, que tienen la capacidad para desarrollar el autoaprendizaje por medio de la imitación de procesos y comportamientos provenientes de la naturaleza, la sociología y otras disciplinas; con el paso de los años se han ido desarrollando múltiples técnicas metaheurísticas, que se las clasifica de acuerdo a la metodología de trabajo (ver Figura 6) [36].

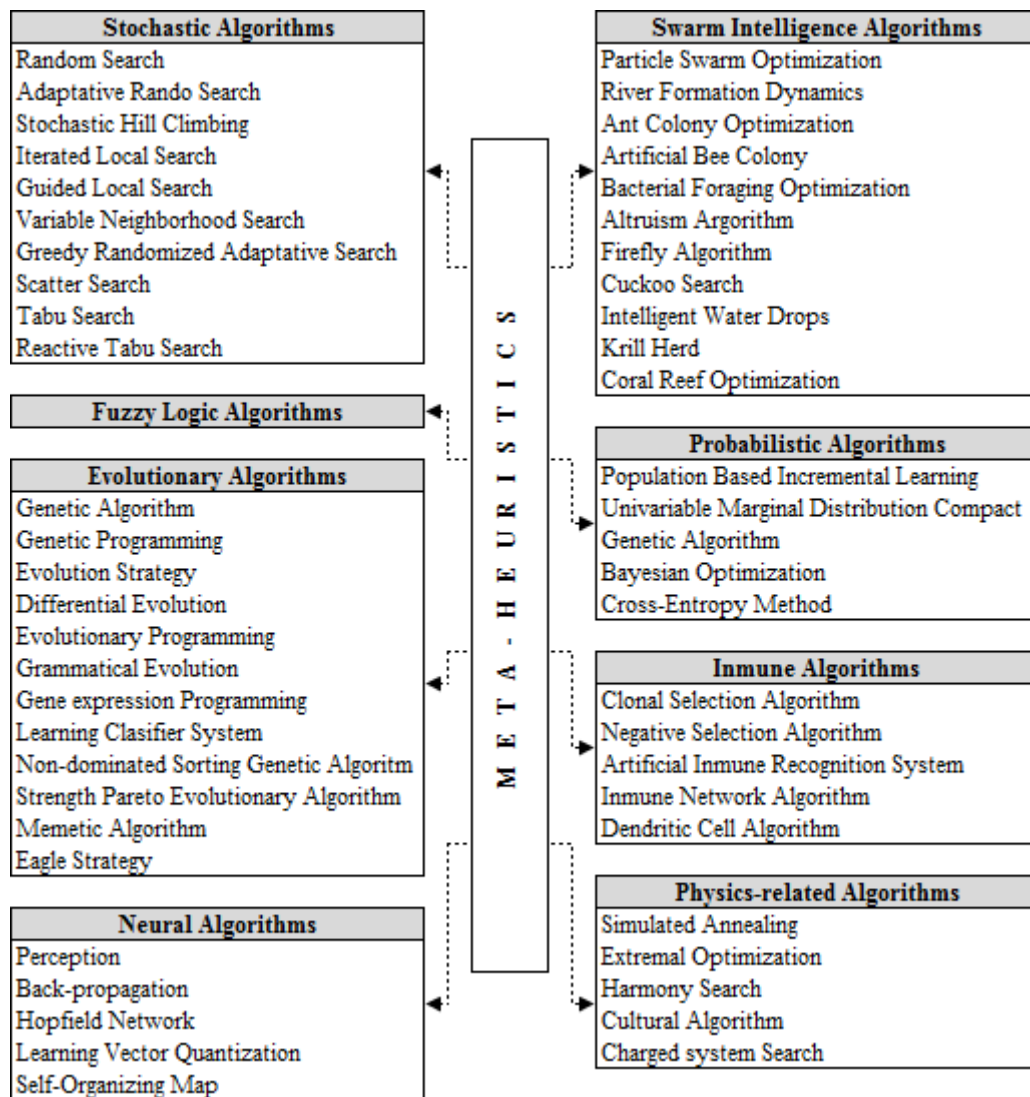


Figura 6: Clasificación técnicas meta-heurísticas según metodología de trabajo.
Fuente: María Macías Infantes

1.2.4 Optimización por Algoritmos Evolutivos.

Los algoritmos evolutivos son procesos de búsqueda y optimización, cuyos orígenes e inspiración son el área biológica, la característica principal consiste en la imitación de procedimientos adaptativos de la naturaleza y se basan en la

supervivencia del mejor individuo, que viene a ser una solución potencial al problema [37]. Se caracterizan por los métodos de generación de soluciones, que parte de un conjunto de soluciones iniciales y se emplea un conjunto de operadores de búsqueda para refinar la solución final. Se clasifican como se muestra en la Tabla 4 [38]:

Tabla 4: Clasificación de los algoritmos evolutivos.

Algoritmo	Representación del Problema	Operadores de Variación	Métodos de Selección
Algoritmos genéticos (John Holland)	Cadena binaria	Mutación y crossover	Selección de rueda de ruleta (a veces con elitismo)
Estrategias de evolución (Rechenberg/Schwefel)	Vector de reales + desviaciones estándar	Mutación gaussiana y crossover aritmético (diferentes tipos)	Diferentes tipos de selección: lambda, mu; lambda+mu...
Programación evolutiva (Fogel)	Números reales	Mutación	Diversos tipos de selección
Programación genética (Koza)	Expresiones-S de LISP representadas habitualmente como árboles	Crossover, algo de mutación	Diversos tipos de selección

Elaborado por Alfonso Mateos Andaluz.

1.2.5 Optimización por Algoritmos Genéticos.

Los algoritmos genéticos actúan sobre una población de cadena de símbolos, denominados cromosomas o individuos, donde cada cromosoma es la codificación de un conjunto de variables de decisión. La codificación tradicional para resolver los problemas mediante AG es la binaria, donde cada cromosoma es una cadena de bits de 0 ó 1 [39]. Los AG son ampliamente usados en aplicaciones donde se requiere conocer la localización de dispositivos de protección dentro de SED, donde aleatoriamente se crea la población inicial para la localización de los equipos de protección y se las va evaluando de acuerdo a la función objetivo, aquellas configuraciones con los mejores valores para la función objetivo se consideran élites y pasan a ser la generación de padres, posteriormente los vectores hijos se combinan con los vectores padres, nuevamente se realiza una comparación de la función objetivo entre los vectores padres, dando paso a la nueva generación, éste proceso se repite hasta satisfacer el criterio de parada, resultando así la solución óptima al problema [22]. Como método de solución se emplea un mecanismo de ruleta o de torneo.

El método imita la teoría de evolución de Darwin, en donde los miembros de una población compiten para sobrevivir y se reproducen, mientras los más débiles mueren. La utilización de un AG se ejecuta de acuerdo a los siguientes 6 pasos básicos, mostrados en la Figura 7 [34]:

- Inicialización: constituye los parámetros del algoritmo, FO del problema y los límites superior e inferior de las soluciones; seguido se genera aleatoriamente un número determinado representativo de individuos (soluciones) formando la población inicial.
- Evaluación de soluciones de primera generación: se inicia evaluando el valor de la FO para cada individuo y posteriormente se ejecuta el bucle principal para generar otras poblaciones más evolucionadas.
- Selección de los mejores individuos: en cada iteración se selecciona una parte de la población anterior para crear una nueva generación, basados en la aptitud de los individuos para optimizar la FO, eligiendo al mejor con una mayor probabilidad. La función de selección es de naturaleza estocástica, como por ejemplo el mecanismo por competición o torneo.
- Producción de nueva generación usando los operadores genéticos de cruce y mutación: el mecanismo de cruce representa la reproducción, para lo cual se agrupan previamente a 2 padres para generar un hijo, resultado de la mezcla de las mejores soluciones anteriores, aquí también interviene la mutación debido a que alguna de las características del hijo es modificada al azar, lo que permite cubrir nuevos espacios de búsqueda no considerados en la población anterior.
- Evaluación de la nueva generación: una vez generada la nueva población se evalúa la función objetivo para cada individuo de ésta.
- Finalización: los últimos 4 pasos se repiten hasta cumplir con el criterio de parada, uno de ellos puede ser hasta obtener diferencias por debajo de cierta tolerancia entre poblaciones seguidas, otra un determinado tiempo máximo o alcanzar un valor específico en la FO.

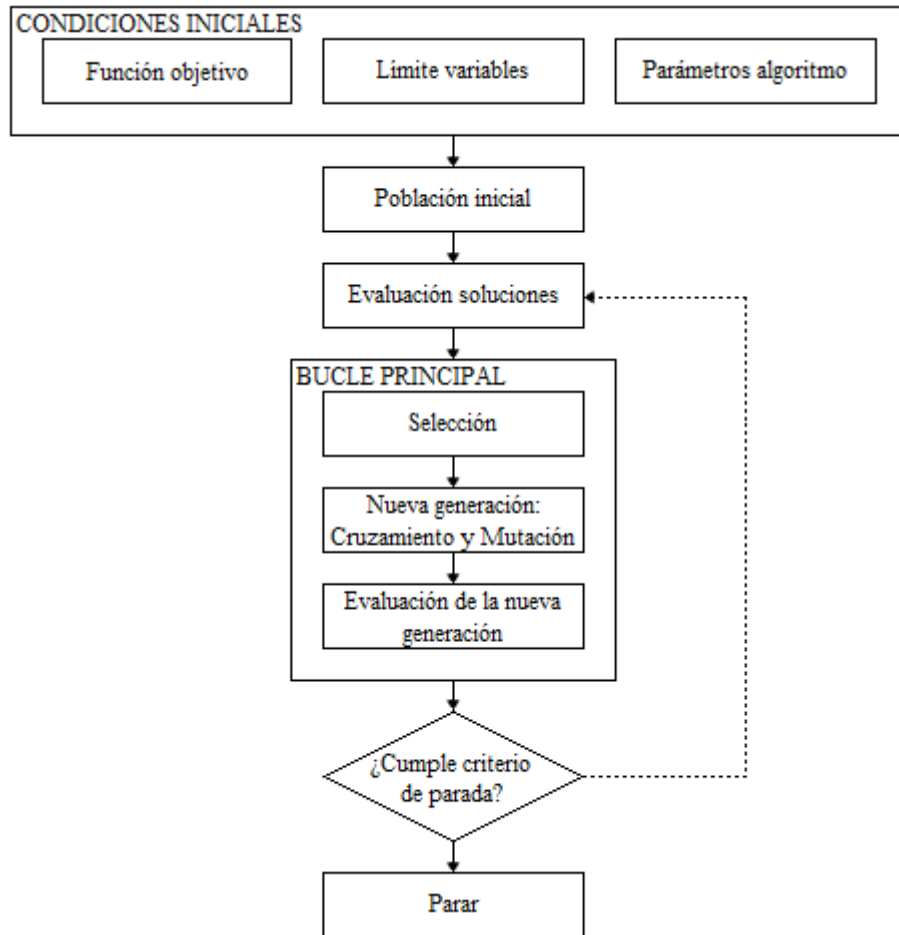


Figura 7: Diagrama de flujo para AG.
Fuente: María Macías Infantes.

Los AG pueden ser aplicados ampliamente en diferentes campos como: análisis de la información, geometría y física, economía, química, ingeniería, medicina, etc. [38].

1.2.6 Confiabilidad.

Confiabilidad es la probabilidad de que un componente, subsistema o sistema desempeñe adecuadamente sus funciones durante un período de tiempo previsto y bajo las condiciones de operación habituales. Esta definición incluye cuatro conceptos importantes [40]:

- Probabilidad, son las características aleatorias asociadas al sistema, hacen que el análisis no pueda ser determinístico.
- Funcionamiento adecuado, esto involucra que el sistema tenga continuidad en el servicio, buena regulación de tensión y buen control de la frecuencia.

- Período de tiempo previsto, es el intervalo durante el cual el componente del sistema debe estar operando continuamente.
- Condiciones de operación, estas condiciones pueden ser constantes o variables, según el lugar donde se localice el sistema.

La confiabilidad del servicio de energía eléctrica, medida a través de índices de desempeño, tiene dos orientaciones diferentes: el registro de eventos pasados y la confiabilidad. Las empresas de servicio eléctrico normalmente llevan un registro estadístico de los eventos pasados, con los cuales pueden evaluar el desempeño de sus sistemas y algunos indicadores económicos como el valor de la ENS. La predicción de los índices de confiabilidad pretende determinar el comportamiento que tendrá la red, basado en el desempeño pasado y ayudar en la toma de decisiones sobre modificaciones de componentes de la red y/o su topología [41].

Para el estudio de la confiabilidad se debe tener conocimiento de varios factores como: la causa, el tiempo requerido para realizar la reparación, la cantidad de equipos fallados en un periodo de tiempo y el efecto que se tienen en otros elementos a causa de una falla [42].

1.2.6.1 Índices de Confiabilidad.

Existen varios índices para valorar la confiabilidad de los SED [2]. A continuación se presentarán algunos de los más utilizados:

- T : Tiempo de estudio o periodo de los registros, generalmente [años].
- nf : Número de interrupciones en el servicio en el periodo T .
- $ttri$: Tiempo para reparación o reconexión de la interrupción i .
- Nf : Número de interrupciones a los usuarios.
- N : Número de usuarios atendidos.
- Nx : Número de usuarios desconectados.
- nx : Número de usuarios afectados por al menos una interrupción.
- $MVAi$: Carga total instalada en el momento de la interrupción i .
- $MVALi$: Carga interrumpida en la interrupción i .
- ENS : Energía no suministrada.

Los índices básicos se pueden calcular para puntos de carga individuales, circuito primario, subestación o sistema de distribución y estos se muestran en la Tabla 5; a partir de estos se pueden calcular otros índices de confiabilidad.

Tabla 5: Índices básicos de confiabilidad.

Índice	Fórmula	Unidad
Frecuencia de fallas	$\lambda = n_f/T$ (1.1)	[fallas/año]
Duración media de las fallas	$r = (\sum_{i=1}^{n_f} ttr_i)/n_f$ (1.2)	[horas/falla]
Indisponibilidad	$U = \lambda * r$ (1.3)	[horas/año] o como probabilidad

Elaborado por Autoría.

Los índices basados en los usuarios, se utilizan para circuitos que atienden zonas residenciales. Registran la frecuencia y duración de las fallas para los consumidores individuales. Los que se van a emplear son: [43]

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index): representa la cantidad promedio de interrupciones de un sistema de distribución en un periodo de tiempo establecido.

$$SAIFI = \frac{N_f}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{n_f} N_{xi}}{N} \quad (1.4)$$

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index): representa la duración promedio de las interrupciones de un sistema de distribución en un periodo de tiempo establecido.

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{n_f} ttr_i * N_{xi}}{N} \quad (1.5)$$

1.3 Fundamentación Metodológica.

El tema de investigación se enmarca dentro de una investigación descriptiva, pues se recolectan datos del problema a investigar, se los miden y evalúan para describir lo que se investiga y encontrar la solución al problema planteado. Se adopta una metodología de evaluación de la confiabilidad fundamentada en la simulación del comportamiento real de la topología de la red, la secuencia de actuación de los elementos de protección y los índices de confiabilidad de los

dispositivos inmersos en el circuito radial. Para la aplicación de la metodología se requieren realizar algunas consideraciones previas: ciertos tramos del AMV pueden tener más de un punto de alimentación, los equipos y elementos de protección que se encuentran en la red primaria son totalmente confiables (tasa de falla es igual a cero), y las fallas consideradas en el sistema son imprevistas y solo puede ocurrir una falla a la vez.

1.3.1 Arquitectura de la Solución.

Para el desarrollo de la solución al problema se utiliza herramientas computacionales, que permiten reducir los tiempos y procesar eficientemente el método propuesto. Para la ubicación óptima de RA se plantea una arquitectura como se muestra en la Figura 8, donde se observa la utilización de 2 programas como son OpenDSS y Matlab. Donde OpenDSS tiene como finalidad el modelamiento y simulación del sistema de distribución, mientras que Matlab está encargado del algoritmo de interface y optimización.

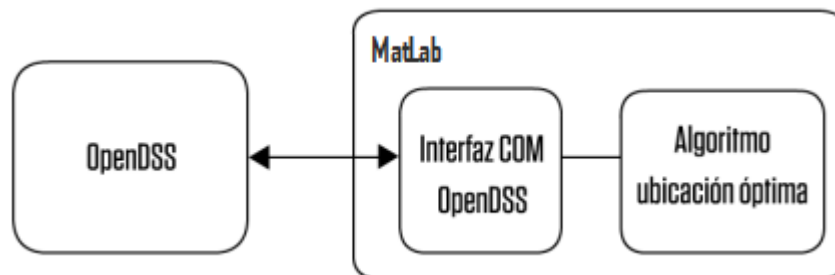


Figura 8: Arquitectura de solución.

Fuente: Autoría.

OpenDSS.

El Sistema de Simulación de Distribución Abierto (OpenDSS) es un software de simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica. En el año 1997 inicia el desarrollo del software en ese entonces llamado DSS, a cargo de Electrotek Concepts Inc., originalmente fue pensado como una herramienta para el análisis de interconexión de generación distribuida, como responsables Roger Dugan y Tom McDermott, en 2004 la empresa Electric Power Research Solutions (EPRI) adquiere el programa y en el 2008 lo lanza al mercado como un software libre, con el objetivo que los usuarios compartan sus experiencias y el software se fortalezca día a día [44]. Por todas las características propias de OpenDSS hacen

que sea uno de los programas computacionales más versátiles, para aplicaciones de simulación de SED [45].

OpenDSS es un software ejecutable en forma de scripts (secuencia de comandos), en cuyo caso los modelos deben realizarse con la información de los parámetros ingresados mediante un código. En la Figura 9 se muestra la estructura de OpenDSS, la interfaz COM (Component Object Model) deja la puerta abierta para que los programadores desarrollen soluciones a sus problemas, basados en programas externos, como Matlab [44].

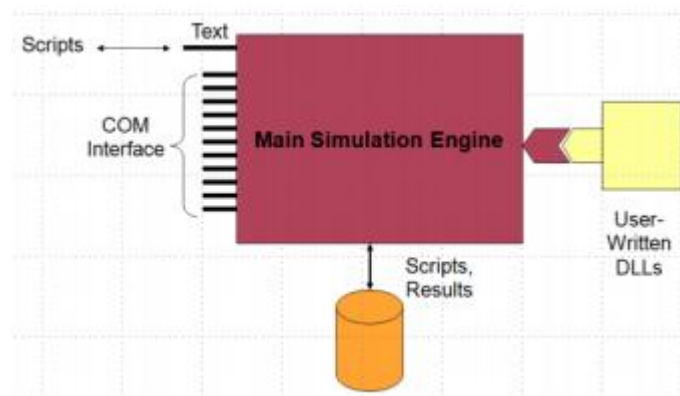


Figura 9: Estructura OpenDSS.
Fuente: Roger Dugan.

1.3.2 Métodos de Investigación.

El diseño metodológico de la investigación se realizó con el propósito de dar respuesta a cada una de las interrogantes planteadas al inicio del proceso de investigación, de esta forma se dio orden y dirección a los procesos desarrollados para alcanzar y responder los objetivos de la misma. Para el desarrollo de la investigación se propone la metodología mostrada a continuación (ver Figura 10). Para ello se tiene presente las características siguientes:

- El problema se formula con un modelo evolutivo multiobjetivo.
- Se trata de un modelo general.
- Los objetivos a minimizar son: Costo Inicial (equipamiento e instalación) e Índices de Confiabilidad (SAIDI y SAIFI).
- La ubicación inicial de los reconectores se asume como conocida.
- En el modelo matemático se considera solamente la instalación de RNC.

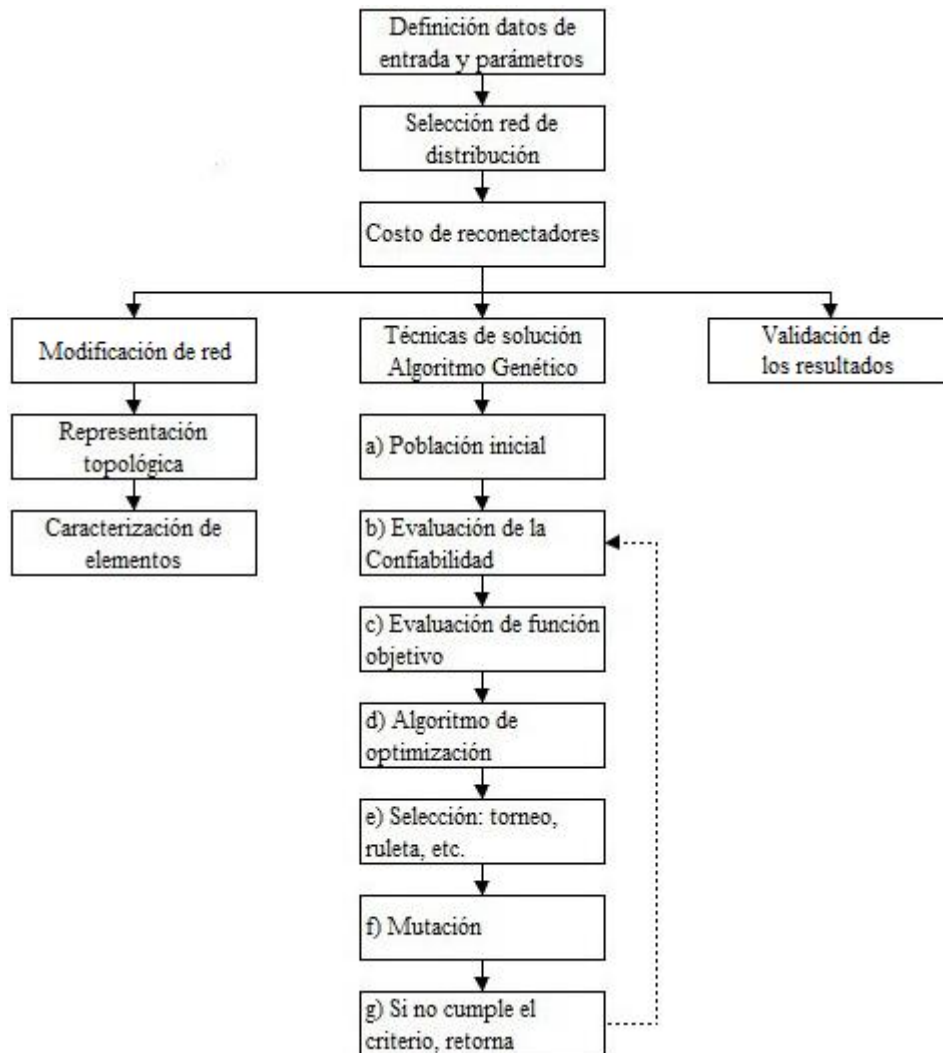


Figura 10: Metodología propuesta.

Fuente: Autoría.

1.4 Conclusiones.

- La revisión del estado del arte permitió el conocimiento y análisis de la evolución y funcionamiento de los SED, así como las acciones tomadas en éstos, con el único propósito de satisfacer las exigencias del día a día, por contar con un servicio de electricidad continuo y de calidad; una forma de evaluar el desempeño del SED acompañada de una propuesta de mejora, es posible a través los criterios de confiabilidad, por ello se plantea el uso de los indicadores de calidad como SAIDI y SAIFI, previa y posteriormente al desarrollo de la investigación, para determinar su viabilidad, a los problemas reales dentro de la red eléctrica de distribución propuesta.

- Los dispositivos de corte y protección son los más recomendados, para minimizar el área de afectación ante alguna interrupción de servicio eléctrico, al tratarse la mayoría de interrupciones por eventos transitorios, el dispositivo a ser instalado en el SED es el conocido Reconectador Automático, ahora bien, para que la inversión resulte atractiva y rentable, también es importante determinar su localización óptima, por ello una vez revisado en el presente capítulo los diferentes mecanismos, se determinó como técnica de optimización a los Algoritmos Genéticos, principalmente por su gran capacidad de resolver problemas complejos; para su desarrollo se requiere de herramientas informáticas que procesen la información de una manera rápida y eficaz, siendo las escogidas OpenDSS para el modelamiento del sistema de distribución y Matlab para la elaboración del proceso de optimización y creación de la interfaz entre ambas plataformas.
- Dentro de la optimización, se determinó la función objetivo, la misma que se pretende maximizarla, para obtener una mejora representativa en la confiabilidad del sistema eléctrico, para ello se relaciona en primera instancia el factor Costo, en referencia a la adquisición e instalación de los RA; seguido del indicador SAIFI que permitirá evaluar el impacto del número de interrupciones en la red eléctrica, y finalmente, el indicador SAIDI que valora la afectación de la duración de la interrupción en la red eléctrica.

2 CAPITULO II. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2.1 Título del proyecto.

Una vez revisado y analizado el estado del arte en lo que respecta al marco teórico y metodológico relacionado al tema de investigación, en el presente capítulo se busca desarrollar una propuesta para dar solución a la problemática de la “Localización óptima de reconfiguradores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución”.

2.2 Objetivo del proyecto.

En base a la información bibliográfica se ha determinado las metodologías y técnicas necesarias para determinar la localización óptima de reconfiguradores con criterios de confiabilidad en un alimentador real de medio voltaje de un sistema eléctrico de distribución, lo que implica, en una mejora en la confiabilidad del sistema en conjunto.

2.3 Descripción de la propuesta.

La presente investigación busca incrementar la confiabilidad de un SED en general, para ello se validará la propuesta en el circuito eléctrico modificado de 12 barras presentado por la IEEE, para lo cual se hará uso de equipos de corte y protección, y si se toma en cuenta que la mayor ocurrencia de fallas son del tipo transitorio, es decir menor a 3 minutos, se instalarán a lo largo del AMV los conocidos RA. En vista que el costo de estos equipos es representativo, es primordial definir su número y principalmente cuál será su localización óptima, de tal manera que se obtenga el mayor provecho a la inversión, la misma que se verá reflejada en un servicio continuo y de calidad para el usuario final.

Para evaluar la confiabilidad del SED se lo hará a través de los índices SAIDI y SAIFI, debido principalmente a que se cuenta con una base de datos extensa desarrollada por la IEEE relacionada con la Confiabilidad de Distribución, para comparación de resultados. Así mismo se cuenta con una amplia literatura especializada, experiencias y proyectos con el único objetivo de mejorar los índices de confiabilidad. Finalmente éstos índices relacionan la confiabilidad promedio de los clientes servidos por la empresa distribuidora, en lugar de la confiabilidad promedio por kVA instalado como lo hacen el TTIK y FMIK. Con la ayuda de los paquetes informáticos Matlab y OpenDSS, que por ser software libre principalmente el último, permite desarrollar de forma autónoma los algoritmos necesarios para encontrar la mejor solución al problema de la investigación, adicionalmente dentro del modelamiento del SED se cuenta con varios parámetros, mismos que serán de gran utilidad para evaluar, determinar y validar las posibles soluciones y conseguir así el objetivo planteado. Adicionalmente dentro de la función objetivo también se incluye los costos, como una variable importante a ser considerada.

El software OpenDSS fue elegido entre todas las aplicaciones disponibles, por superar la dificultad de muchos investigadores a la hora de modelar redes eléctricas con recursos distribuidos, haciendo uso de las herramientas tradicionales. Se trata de un simulador que no solo se ajusta a un tipo de análisis, sino que al contrario puede soportar análisis en el dominio de la frecuencia, dominio temporal o análisis de armónicos. Otra ventaja que posee, es que cuenta con la posibilidad de trabajar con una programación orientada a objetos, lo que permite implementar todas las características de la red en ella, usualmente los diferentes tipos de características vienen cada una en sus propios formatos, dificultando la ejecución de las simulaciones. Finalmente las interfaces típicas de Windows, presentan muchas limitaciones, por ser intuitivas, esto es superado mediante el uso de la interfaz basada en scripts de texto de OpenDSS.

La propuesta planteada en cuanto a la localización óptima de reconectores esta cimentada dentro de los conceptos de confiabilidad de un sistema de distribución, cuya importancia radica en los puntos señalados a continuación:

- a) Análisis y mejoramiento del funcionamiento del SED.- con un adecuado análisis de confiabilidad, permite definir los puntos críticos donde se presentan mayor número de interrupciones así como sus duraciones, los cuales pueden incluir dentro de los planes futuros de mejora.
- b) Nivel de satisfacción de los consumidores.- una vez realizado el análisis de confiabilidad y tomado los correctivos necesarios en aquellos puntos débiles del SED, se garantiza una mejor calidad de servicio al usuario final.
- c) Herramientas para expansión del SED.- para un crecimiento del sistema se requiere un análisis previo, siendo el siguiente paso escoger las mejores opciones para cubrir los requerimientos.
- d) Planificación de mantenimiento y ubicación de recursos.- definido los puntos críticos, el área de mantenimiento tiene que realizar las tareas predictivas, preventivas y/o correctivas necesarias, para garantizar el servicio eléctrico. Los resultados del análisis también arrojaran la necesidad de instalar nuevos equipos de corte y protección, como RA, siendo primordial conocer su ubicación de instalación para obtener el mayor beneficio.
- e) Cumplimiento de regulaciones vigentes.- al poner en práctica las conclusiones del análisis de confiabilidad, es un hecho que existirá una mejora en los indicadores de servicio, evitando con ello llamados de atención y hasta penalizaciones a la distribuidora.

2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.

La metodología que se propone para determinar la localización óptima de reconectores en base a los criterios de confiabilidad en un AMV, por tratarse de un problema de optimización estocástico – multiobjetivo, donde se puede apreciar la presencia de actores como el SED y usuario final, se pretende maximizar la FO que será descrita más adelante, permitiendo obtener una mejora en los índices de confiabilidad SAIDI y SAIFI del AMV. La metodología está compuesta por siete pasos a saber y que se pueden apreciar en la Figura 11.

- Paso I: Definición de datos de entrada.- inicialización de los valores correspondientes de todas aquellas variables preestablecidas y que permitirán realizar los procesos matemáticos y de decisión en el desarrollo del algoritmo.
- Paso II: Desarrollo de interface.- en vista de que se trata de un considerable número de procesos iterativos, la solución es desarrollada mediante las herramientas informáticas OpenDSS y Matlab, las misma que deben mantener una comunicación permanente en ambos sentidos, para llevar a cabo el intercambio de información.
- Paso III: Pre-localización de RA.- para lo cual se requiere previamente la generación de la población inicial, como parte del proceso de optimización, dicha población viene hacer la representación del punto de partida para la solución de localización óptima de RA en base a los criterios de confiabilidad.
- Paso IV: Flujo de carga.- para ello se selecciona el circuito de prueba, para posteriormente modificarlo agregando RA y someterlo al análisis de flujo de carga, con la finalidad de obtener los indicadores de confiabilidad SAIDI y SAIFI del AMV.
- Paso V: Cálculo de parámetros de la FO y valor óptimo.- continuando con el proceso de optimización, con los datos iniciales predefinidos y los valores obtenidos del flujo de carga del circuito de prueba, se procede a calcular los términos que componen la FO, así como la FO y su valor máximo en cada una de las iteraciones.
- Paso VI: Aplicación AG.- para poder continuar con la siguiente iteración la población inicial antes de ello debe evolucionar, aplicando la técnica de optimización elegida, es decir el AG desarrollado, a la nueva población se le denominará como población mejorada.
- Paso VII: Resultados obtenidos.- una vez cumplida todas las iteraciones y con ello la obtención del valor óptimo de la FO, corresponde escoger una del conjunto de posibles soluciones, siendo ésta la mayoría de las veces aquella que presenta el mayor valor en la FO.

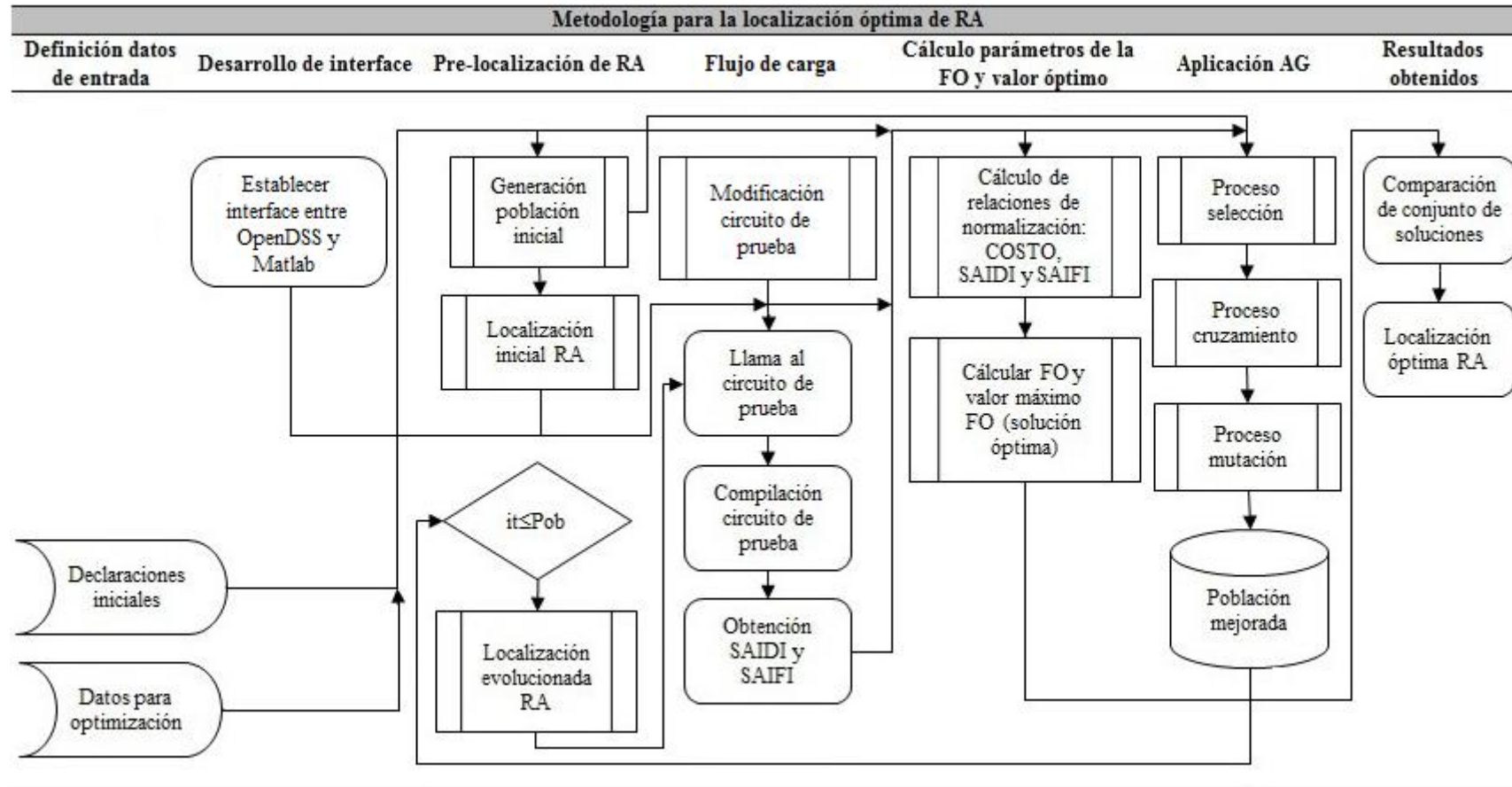


Figura 11: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.
Elaborado por Autoría.

2.4.1 Definición de datos de entrada.

Los actores involucrados en el problema pretenden una finalidad en común, que consiste en el incremento de la confiabilidad al menor costo posible; de todas las investigaciones analizadas hasta el momento, se pueden identificar varias técnicas de optimización como: Recocido Simulado, Chu & Beasley, Evolución Diferencial, Enjambre de Partículas y Algoritmos Genéticos. Para los dos primeros casos se tiene un elevado número de iteraciones e implementación compleja respectivamente; mientras que el tercero y cuarto presentan una convergencia prematura, con el riesgo que caiga la solución en un óptimo local. Por ello se acoge la recomendación de la literatura que para la localización de componentes dentro de los SED el mejor método resulta ser los AG.

Como todo problema de optimización se compone de tres elementos que serán identificados a lo largo del presente trabajo, se iniciará determinando las variables de la función, las mismas que son:

λ_{Cu}	→	Peso de prioridad del factor COSTO.
λ_{SAIDI}	→	Peso de prioridad del índice SAIDI.
λ_{SAIFI}	→	Peso de prioridad del índice SAIFI

Para empezar el proceso de solución se debe desde un inicio establecer los valores que tomarán ciertas variables para la optimización, como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6: Parámetros de optimización.

Variable	Valores recomendados
Población inicial	0 - 10
Criterio de parada, número de generaciones	1 - 20
Selección	Torneo
Tasa de cruzamiento	≈ 0.8
Tasa de mutación	≈ 0.01

Elaborado por Autoría.

Para representar los RNC en el SED, se hace uso de una codificación binaria, se utiliza un vector con las variables binarias (0 ó 1), siendo uno (1) la ratificación de la posición del RNC que inicialmente solo era una propuesta, mientras un cero (0) indica que la propuesta inicial no es viable y por lo tanto no se recomienda instalar el equipo en el mencionado punto. La Figura 12 presenta el esquema de codificación a ser empleado:

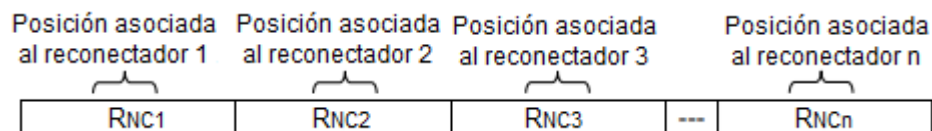


Figura 12: Esquema de codificación.

Fuente: Autoría.

Adicionalmente, también es necesario predefinir los valores correspondientes a las variables mostradas en la Tabla 7:

Tabla 7: Inicialización de variables.

Variable	Valores recomendados
Número RA	4
Meta anual SAIFI	7
Meta anual SAIDI	10
Costo referencial RA	≈ 30000
Peso de prioridad COSTO	0.2
Peso de prioridad SAIDI	0.4
Peso de prioridad SAIFI	0.4

Elaborado por Autoría.

En cuanto al número de RA disponibles, se ha considerado el criterio técnico y operativo para ser instalados dentro del AMV, pues un elevado número de reactivadores dentro de la red, causaría complejidades al momento de realizar el estudio de coordinación de protecciones, eso sin mencionar el incremento en su costo. Las metas anuales de los indicadores de servicio técnico, las establece en cada región el ente competente para hacer cumplir las regulaciones vigentes, para nuestro país dichos señalamientos se encuentran dentro de la ARCERNR 002/20 [46]. Para los pesos de prioridad es muy importante que la sumatoria de todos ellos debe ser igual a la unidad, ya depende del diseñador el grado de importancia que requiera dar a una u otra variable, para el presente estudio por estar basado en los criterios de confiabilidad se les da un mayor peso a estas variables.

Para las restricciones de la FO, se considera aquellas variables que la conforman, y que resultan producto de la normalización, las mismas que se desarrollan más adelante en forma de inecuaciones para determinar la FO, y están son las que se muestran a continuación:

$RC_{Ut}, RC_{Umin}, RC_{Uref}$ → Relaciones de costos.

$RSAIDI_t, RSAIDI_{min}, RSAIDI_{ref}$ → Relaciones de indicador SAIFI.

$RSAIFI_t, RSAIFI_{min}, RSAIFI_{ref}$ → Relaciones de indicador SAIDI.

2.4.2 Desarrollo de interface.

Como ya se describió con anterioridad para la co-simulación se utilizará los software Matlab y OpenDSS, requiriendo que entre ambos exista un vínculo que permita transferir en doble sentido la información, pues bien, el responsable de establecer esta interfaz es el software Matlab, en primera instancia se debe definir variables, con el nombre de ruta del directorio (*myDir*) para lo cual se hace uso de las líneas de comando mostradas en la Tabla 8:

Tabla 8: Líneas de comando para interface.

Comando	Descripción
<code>DSSObj = actxserver('OpenDSSengine.DSS')</code>	Es utilizado para llamar al programa OpenDSS y así crear un vínculo entre ambos software. Permite acceder a las propiedades y crear nueva instancia de la interface DSS.
<code>DSSStartOK = DSSObj.Start(0)</code>	Esta función se utiliza para iniciar el OpenDSS, devuelve un valor booleano que indica el éxito del inicio, cuando existe algún error en el proceso de inicialización el valor booleano es cero.
<code>DSSText = DSSObj.Text</code>	Permite iniciar y acceder a la interfaz de texto, por medio del cual los comandos de texto estándar de OpenDSS pueden enviar y recuperar mensajes.
<code>if DSSStartOK</code>	La sentencia condicional <i>if</i> trabaja en conjunto con el comando <code>DSSStartOK = DSSObj.Start(0)</code> , al devolver un valor distinto de cero, el algoritmo empieza a realizar lo que se ha programado.
<code>DSSText.command='Compile (C:\Users\Usuario\Documents\Open DSS\IEEE12barrasconfiabilidad _01\IEEE12barrasconfiabilidad _01\Master.dss)'</code>	Esta línea permite especificar la localización del archivo que se requiere llamar, en caso que la dirección no sea la exacta, el programa presentará un error y por lo tanto el archivo no se podrá abrir.
<code>DSSCircuit=DSSObj.ActiveCircuit</code>	Permite devolver una interfaz de tipo circuito que apunta al circuito activo, permitiendo editar las propiedades de distintos elementos del circuito o los parámetros para un elemento específico en el OpenDSS.
<code>DSSSolution=DSSCircuit.Solution</code>	Se usa el comando para el control del proceso de solución dentro del tiempo establecido, además se puede observar y monitorear el circuito.
<code>DSSText.Command='Set MaxControlIter=200'</code>	Se emplea la sintaxis <i>Command</i> cuando se requiere de una acción a realizar, para este caso en particular se especifica un control de iteraciones.

<pre>DSSSolution.Solve</pre>	<p>Esta línea permite iniciar con la ejecución de la solución, sin embargo implica que se va a mostrar los resultados a través de una ventana o monitor, para ello se requiere de instrucciones adicionales.</p>
<pre>DSSText.Command='new energymeter.M1 element=Line.l1 terminal=1 localonly=no'</pre>	<p>La línea es empleada para declarar un medidor de energía, sobre el elemento del circuito denominado Line.l1, con el cual se puede observar su comportamiento.</p>
<pre>DSSText.Command='show busflow bg2 kva elem'</pre>	<p>Con esta sentencia podemos mostrar los resultados obtenidos, a través de los monitores incluidos al circuito.</p>
<pre>DSSText.Command='Export monitors m1' DSSText.Command='Plot monitor object= m1 channels=(1)'</pre>	<p>La combinación de estas líneas permite en primera instancia enviar los valores almacenados en el monitor (archivo .txt), para posteriormente graficar los datos de cada canal y presentarlos en pantalla para el análisis correspondiente.</p>

Elaborado por Autoría.

2.4.3 Pre-localización de RA.

Con los valores conocidos de los parámetros de Tamaño de población y Número de RA, se desarrolla un bucle finito de forma aleatoria de tal manera que se genere una matriz [pob X n_R] con código binario (ver Figura 13), resultando así la población inicial. Cabe indicar que para darle tratamiento a esta matriz, previamente se la debe codificar a base decimal para relacionarla con las demás variables.

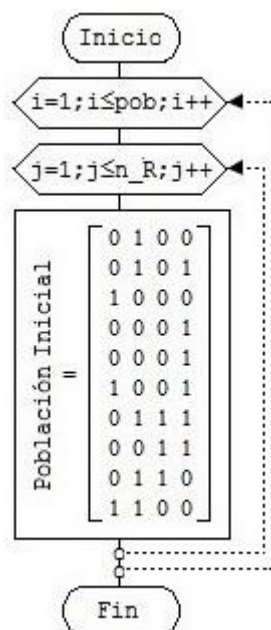


Figura 13: Generación población inicial.
Elaborado por Autoría.

Utilizando la matriz binaria generada en la población inicial, se procede mediante condicionales a ubicar RA en los ramales que fueron establecidos técnica y operativamente, en cada uno de los individuos que contenga el valor de UNO (ver Figura 14), para posteriormente evaluar la confiabilidad del AMV.

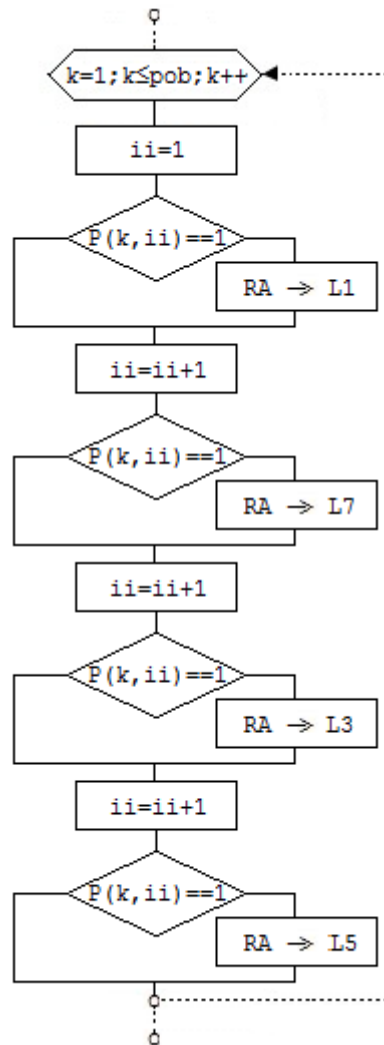


Figura 14: Pre-ubicación de reconectores.

Elaborado por Autoría.

Mientras las iteraciones no alcancen el valor de las Generaciones, la población inicial será reemplazada por una nueva población mejorada 1, resultante de la aplicación del AG, y así sucesivamente la población va evolucionando en una mejor para cada una de las generaciones.

2.4.4 Flujo de carga.

La investigación presente se desarrollará de forma general para un SED, validando su correcto funcionamiento en un sistema de distribución de prueba de

12 barras formulado por la IEEE, como se muestra en la Figura 15, el cual será modificado y simulado en el software OpenDSS en conjunto con Matlab. El alimentador de prueba IEEE tienen las características técnicas siguientes:

- Listado de matrices de impedancias con su resistividad y matrices de admitancias con su permitividad, para la configuración utilizada.
- Flujo radial, considerando los sistemas de entrada, carga total, pérdida total y condensadores de derivación.
- Perfil de tensión, magnitudes y ángulos por fase de cada nodo, viene expresado en por unidad.
- Regulador de tensión, ajustes iniciales y ajustes de la toma final.
- Flujo de potencia radial, datos completos de cada nodo incluye flujo de línea en amperios y grados, potencia de línea por fase y total.

El alimentador de prueba IEEE 12 barras se trata de una red eléctrica de pequeño porte, sin que esto signifique que sea sencilla, pues por el contrario posee características interesantes que se detallan a continuación:

- Corto pero relativamente cargado para un alimentador de 12.47kV.
- Además de la subestación cuenta con regulador de voltaje formado por tres unidades monofásicas conectadas en estrella.
- Líneas áreas en fases diferentes, con una tasa de falla de 0,1 kft/año y tiempo de reparo predeterminado de 3 horas/año.
- Banco de condensadores en derivación.
- Transformadores en línea, con una tasa de falla de 0.1 kft/año, mientras el porcentaje de fallas para que se conviertan en permanentes es del 20% y el tiempo de reparo predeterminado de 3 horas/año.
- Generación distribuida, a través de un motor de inducción.
- Cargas puntuales y distribuidas desequilibradas, el número de clientes predeterminado es de 1 para cada una de las cargas.

Además existen suficientes interruptores y a ellos se les adicionará los reconectores, para que se puedan poner en marcha los procedimientos del método de localización óptima. El modelo utilizado fue tomado de la librería del software OpenDSS (*C:\Program Files\OpenDSS\Examples\InductionMachine*).

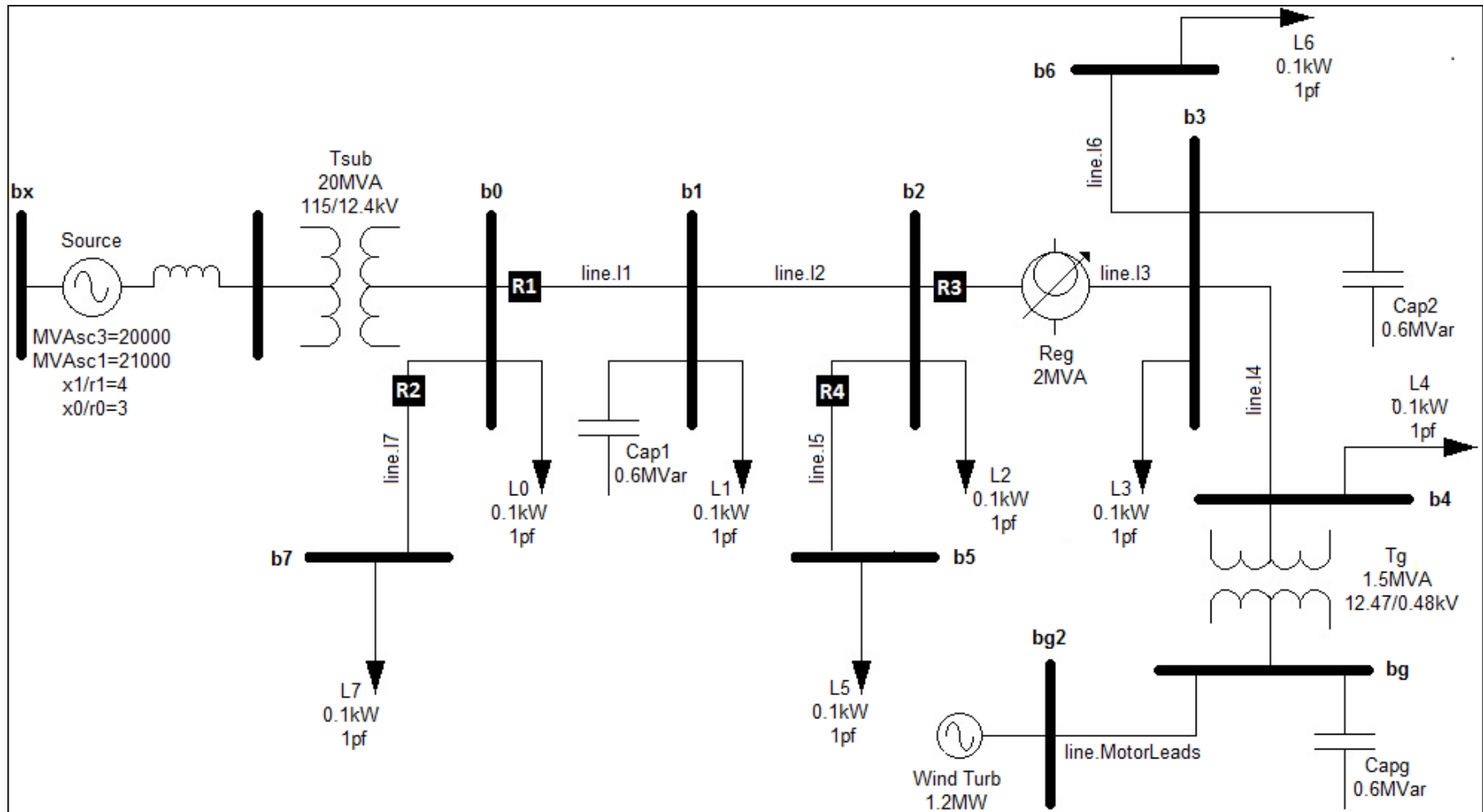


Figura 15: Diagrama unifilar de circuito de prueba IEEE 12 barras.

Fuente: R. C. Dugan.

Como siguiente paso se tiene que implementar el circuito de prueba IEEE 12 barras en el software OpenDSS, pero por tratarse de un modelo modificado ya desarrollado por el profesor Roger C. Dugan, la descripción de su modelamiento se lo detalla en la sección Anexos, para lo cual se empleó un programación orientada a objetos (POO) con la finalidad de brindar un mejor entendimiento, ante cualquier duda al respecto se cuenta con el soporte propio de OpenDSS.

Previamente a ejecutar el flujo de carga en el circuito de prueba IEEE 12 barras, cabe indicar que como el estudio se basa en los criterios de confiabilidad, se debe incluir scripts para evaluar la confiabilidad y así disponer de los indicadores SAIDI y SAIFI en cada uno de los individuos de la población. El software OpenDSS es el encargado de llevar a cabo la evaluación de la confiabilidad de la red IEEE, la cual sigue la estructura mostrada en la Figura 16 y mediante el uso de las ecuaciones (1.4) y (1.5):

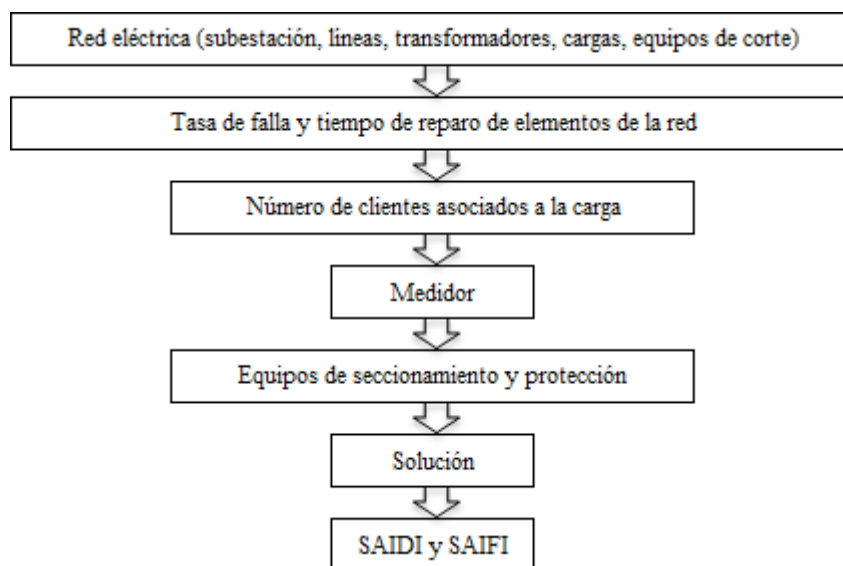


Figura 16: Estructura de análisis de confiabilidad.
Fuente: Autoría.

2.4.5 Cálculo de parámetros de la FO y valor óptimo.

La FO de la investigación en desarrollo, por estar basada en los criterios de confiabilidad, se la ha estructurado con los índices de confiabilidad del servicio técnico SAIDI que relaciona la duración de clientes interrumpidos con el número total de clientes y SAIFI que relaciona el número total de clientes interrumpidos con el número total de clientes, a ellas se les adiciona el factor COSTO que

representa el valor económico referencial del equipo RA más los materiales y mano de obra necesarios para su instalación.

En vista que los términos que conformaran la FO, manejan unidades dimensionales o criterios diferentes, es necesaria la normalización previa, para proceder con la comparabilidad entre los indicadores de datos, caso contrario los resultados del análisis de datos se verán afectados, porque aquellos de mayor magnitud resaltarán, mientras los de menor magnitud se opacarán. Después de que los datos originales se procesan mediante la normalización de datos, cada índice tiene el mismo orden de magnitud, lo que es adecuado para una evaluación comparativa exhaustiva. Los problemas de optimización requieren normalización, lo que permite mejorar la capacidad de aplicación de los algoritmos, sino paradójicamente serán difíciles o incluso imposibles de converger. Se emplea la técnica de normalización mínima-máxima que consiste en realizar una transformación lineal en los datos originales y convertir el número a decimal entre (0 y 1).

El factor de normalización del factor COSTO donde se incluye los valores de la inversión del equipo e instalación, se forma en función de la relación de costos del individuo t con un costo de referencia, el mismo que se encuentra incluido dentro de la sección anexos; la mencionada relación se indica en la Figura 17.

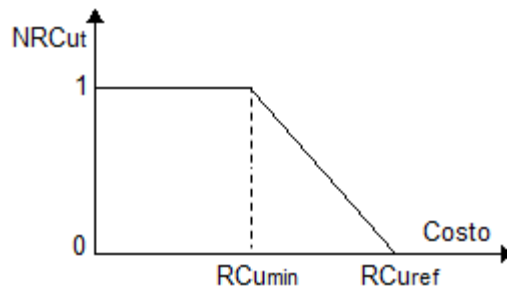


Figura 17: Normalización del costo.

Fuente: Autoría.

$$RCu_t = \frac{Cu_t}{Cu_{ref}} \quad (2.1)$$

$$NRCu_t = \begin{cases} 1 & RCu_t < RCu_{min} \\ \frac{RCu_{ref} - RCu_t}{RCu_{ref} - RCu_{min}} & RCu_{min} \leq RCu_t \leq RCu_{ref} \\ 0 & RCu_t > RCu_{ref} \end{cases} \quad (2.2)$$

RCu_t → Relación de costo, para el individuo t .

- C_{ut} → Costo del período de análisis, para el individuo t.
- C_{uref} → Costo de referencia.
- NRC_{ut} → Factor de normalización de la función costo para el individuo t.
- RC_{umin} → Relación de costos mínimos y de referencia, para el período de análisis.
- RC_{uref} → Relación de costos mínimos y de referencia, para el período de análisis.

El factor de normalización de la función del indicador SAIFI, considera el número de veces que el AMV o alguno de sus ramales son afectados por la alguna interrupción de servicio, con el objetivo de dar cumplimiento a los límites permitidos para éste indicador dentro de la Regulación No. ARCERNNR-002/20, como se indica en la Figura 18.

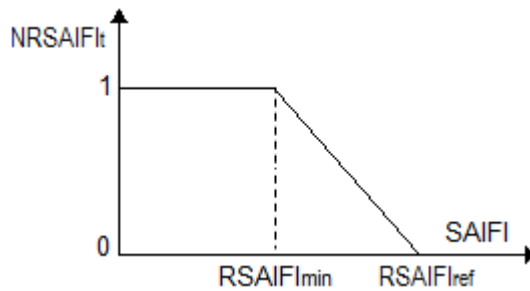


Figura 18: Normalización del SAIFI.
Fuente: Autoría.

$$RSAIFI_r = \frac{SAIFI_t}{SAIFI_{ref}} \quad (2.3)$$

$$NRSaifI_r = \begin{cases} 1 & RSAIFI_t < RSAIFImin \\ \frac{RSAIFiref - RSAIFI_t}{RSAIFiref - RSAIFImin} & RSAIFImin \leq RSAIFI_t \leq RSAIFiref \\ 0 & RSAIFI_t > RSAIFiref \end{cases} \quad (2.4)$$

- $RSAIFI_t$ → Relación de indicador SAIFI, para el individuo t.
- $SAIFI_t$ → SAIFI del período de análisis, para el individuo t.
- $SAIFiref$ → Valor de referencia del indicador SAIFI.
- $NRSaifI_t$ → Factor de normalización de la función del indicador SAIFI para el individuo t.
- $RSAIFImin$ → Relación de indicador SAIFI mínimo y de referencia, para el período de análisis.
- $RSAIFiref$ → Relación de indicador SAIFI mínimo y de referencia, para el período de análisis.

El factor de normalización de la función del indicador SAIDI, considera el tiempo que el AMV o alguno de sus ramales son afectados por la alguna interrupción de servicio, con el objetivo de dar cumplimiento a los límites permitidos para éste indicador dentro de la Regulación No. ARCERNNR-002/20, como se indica en la Figura 19.

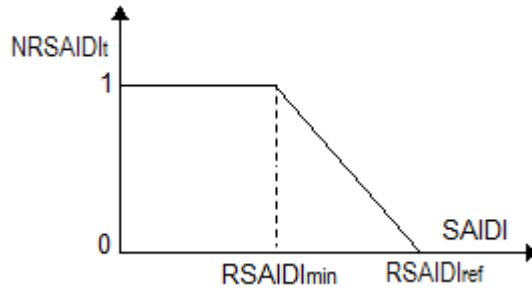


Figura 19: Normalización del SAIDI.

Fuente: Autoría.

$$RSAIDI_t = \frac{SAIDI_t}{SAIDI_{ref}} \quad (2.5)$$

$$N RSAIDI_r = \begin{cases} 1 & RSAIDI_t < RSAIDI_{min} \\ \frac{RSAIDI_{ref} - RSAIDI_t}{RSAIDI_{ref} - RSAIDI_{min}} & RSAIDI_{min} \leq RSAIDI_t \leq RSAIDI_{ref} \\ 0 & RSAIDI_t > RSAIDI_{ref} \end{cases} \quad (2.6)$$

$RSAIDI_t$ → Relación de indicador SAIDI, para el individuo t.

$SAIDI_t$ → SAIDI del período de análisis, para el individuo t.

$SAIDI_{ref}$ → Valor de referencia del indicador SAIDI.

$N RSAIDI_t$ → Factor de normalización de la función del indicador SAIDI para el individuo t.

$RSAIDI_{min}$ → Relación de indicador SAIDI mínimo y de referencia,

$RSAIDI_{ref}$ para el período de análisis.

El problema de investigación como en la mayoría de los casos de la vida real, se trata de una programación no lineal, que se basa en que una FO, se puede expresar de la forma general, es decir consiste en, minimizar o maximizar una función $f(x)$ no lineal, considerado algunas restricciones iniciales de igualdad o desigualdad. El resultado a obtener no es un número exacto, sino lo que se trata de un espacio de soluciones.

$$FO = \{min/ max f(x)\} \xrightarrow{restriccion} \begin{cases} g_i(x) \leq 0 \rightarrow i = 1, \dots, m \\ h_j(x) = 0 \rightarrow j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (2.7)$$

Para hallar la solución al problema planteado, se define la FO que relaciona el Costo y la Confiabilidad a través de los indicadores SAIFI y SAIDI, para un período de análisis semanal:

$$maxFO_t = \lambda_{Cu} \times NRCu_t + \lambda_{SAIFI} \times NRSAIFI_t + \lambda_{SAIDI} \times NRSAIDI_t \quad (2.8)$$

Se debe tener presente que:

$$\lambda_{Cu} + \lambda_{SAIFI} + \lambda_{SAIDI} = 1 \quad (2.9)$$

- t → Soluciones posibles (individuo del AG).
- FO_t → Función objetivo propuesta, para el individuo t.
- $\lambda_{Cu}, \lambda_{SAIFI}, \lambda_{SAIDI}$ → Pesos de prioridad de: costos, indicador SAIFI, indicador SAIDI.
- $NRCu_t$ → Factor de normalización de la función costo para el individuo t.
- $NRSAIFI_t$ → Factor de normalización de la función del indicador SAIFI para el individuo t.
- $NRSAIDI_t$ → Factor de normalización de la función del indicador SAIDI para el individuo t.

Las restricciones o incertidumbre dentro del modelo propuesto y que están obligadas a ser cumplidas, son las que están relacionadas a los costos e índices de confiabilidad en las ecuaciones (2.2), (2.4) y (2.6).

Pues bien para continuar con la metodología de solución mostrada en la Figura 11, para el desarrollo del algoritmo de optimización, se hace uso del software MATLAB, el mismo que mediante la interfaz establecida en el paso 2, permitirá interactuar con el software OpenDSS, permitiendo en conjunto obtener la solución al problema de investigación planteada. Para el factor COSTO, en primera instancia el diseñador debe establecer un costo referencial, que por lo general se recomienda que sea el valor más alto del mercado, se requiere de un factor de normalización de costos (equipo e instalación), como se desarrolló en la Figura 17. Se procede a ingresar las líneas de código respectivas de acuerdo a la lógica mostrada a continuación en la Figura 20.

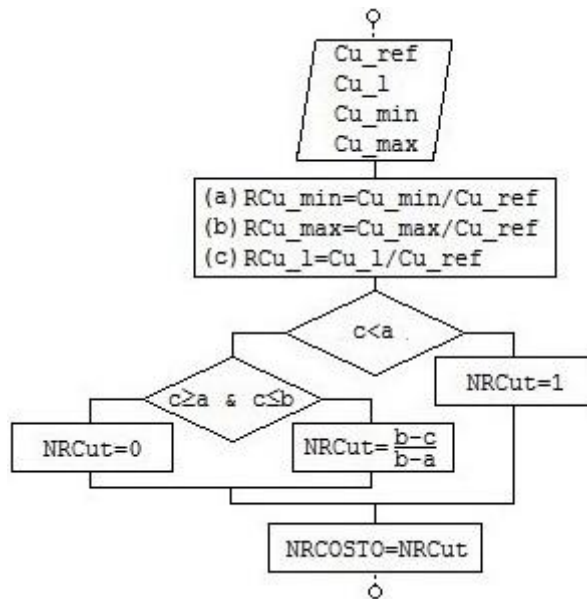


Figura 20: Factor COSTO de la FO.
Elaborado por Autoría.

Para el factor SAIFI, de similar forma se debe establecer un factor de normalización de la función del indicador SAIFI, tal cual como se desarrolló en la Figura 18, el diseñador define un valor referencial SAIFI de acuerdo a la Regulación No. ARCERNR-002/20, así como un valor mínimo y máximo de acuerdo a los objetivos operativos de la Empresa Distribuidora; con ello se procede a desarrollar el algoritmo respectivo siguiendo la lógica mostrada en la Figura 21.

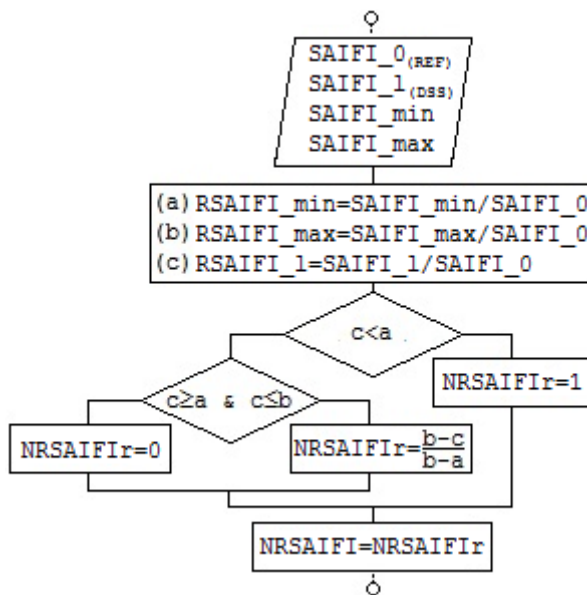


Figura 21: Factor SAIFI de la FO.
Elaborado por Autoría.

Para el factor SAIDI, de similar forma se debe establecer un factor de normalización de la función del indicador SAIDI, tal cual como se desarrolló en la Figura 19, el diseñador define un valor referencial SAIDI de acuerdo a la Regulación No. ARCERNNR-002/20, así como un valor mínimo y máximo de acuerdo a los objetivos operativos de la Empresa Distribuidora; con ello se procede a desarrollar las líneas de código respectivo siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la Figura 22.

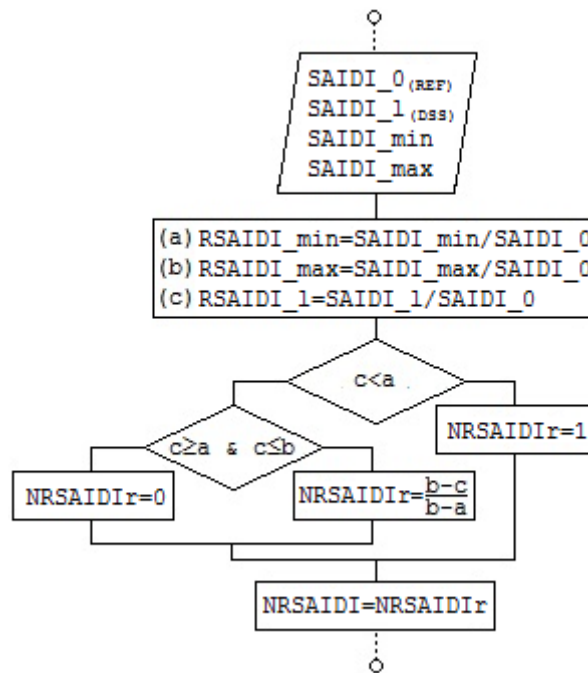


Figura 22: Factor SAIDI de la FO.
Elaborado por Autoría.

Pues bien, una vez que se ha obtenido una parte de los términos de la FO, el diseñador debe introducir los pesos que se establecerá a cada uno de los factores de normalización, completando así la ecuación (2.8). Con estos valores se procede a calcular la FO para cada uno de los individuos de las población definidas en el paso3.

Seguidamente dentro de un bucle, se extrae el valor máximo del conjunto de valores de FO, con lo que obtiene el valor de la población de FO máximo en la generación *it* y el valor máximo de FO en la generación *it* (ver Figura 23); gracias a los cuales ya se conoce el cromosoma o cadena binaria (STR) del valor máximo de FO para la generación respectiva. Ahora es tiempo de generar una nueva población mejorada, que permita formar el conjunto de posibles soluciones a la

problemática de la localización óptima de reconectadores, para ello se emplea la técnica de optimización elegida denominada AG.

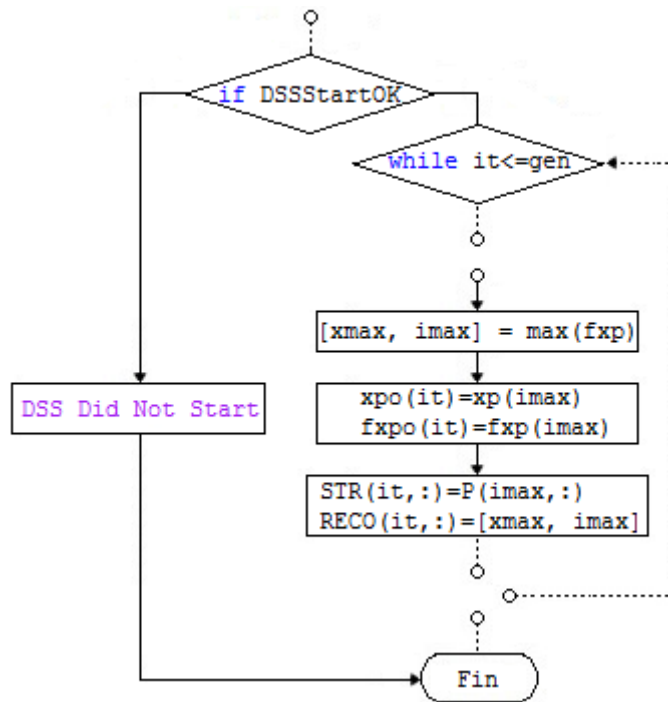


Figura 23: Valores máximos de FO y Población.
Elaborado por Autoría.

2.4.6 Aplicación Algoritmo Genético.

Proceso de Selección: para las nuevas generaciones que fueron establecidos en un principio, los cromosomas debe evolucionar, es aquí donde se empieza a emplear el AG, con una primera etapa que consiste en la Selección de Parejas, la misma que ha sido desarrollada con la opción de elegir entre cuatro métodos disponibles a saber: Competición o Torneo, Ruleta, Estocástico y Biclassista; por defecto se establece el primer método, debido a que según la literatura es la que mayor participación de individuos permite, gracias a la función aleatoriedad y así mismo solo permite descendencia de aquellos padres fuertes, tal cual como se muestra en la Figura 24. Para elaboración del AG se emplea el uso funciones, en lo que respecta a la selección se llama a la función “*Op_Selec_Torneo*”, y de similar forma para el resto de métodos se llama a su función respectiva y el resultado final se almacena en la variable “*SelPop*”.

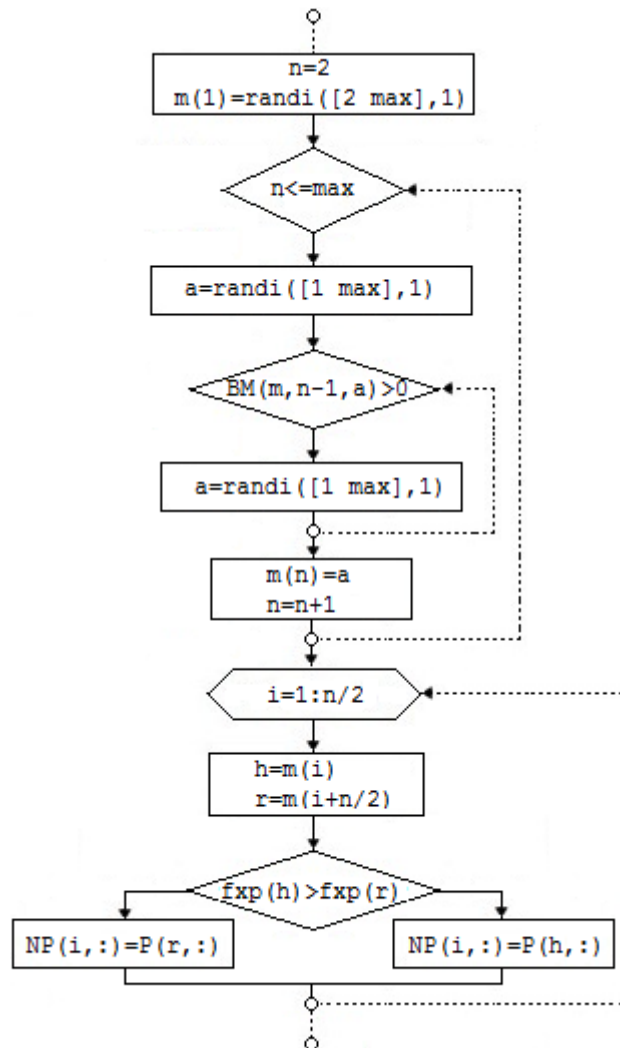


Figura 24: Selección por Torneo (NP).
Elaborado por Autoría.

Proceso de Cruzamiento: permite la recombinación de individuos generando una descendencia, para ello también se llama a una función que se denomina “*AGBIN_recomb*” encargada de realizar la recombinación por pares de individuos de la población, retornando una nueva población con individuos recombinados, tal como se muestra en la Figura 25, las parejas de individuos a recombinar se forman según la posición de individuos en el vector Población, es decir, el primero con segundo, tercero con cuarto, y así sucesivamente. Puede especificarse la técnica de cruzamiento o recombinación a utilizar entre los siguientes tipos: rdisc (recombinación discreta), xovps (cruce de punto único), xovpsrs (cruce de punto único con sustituto reducido), xovpd (cruce de dos puntos), xovpdrs (cruce de dos puntos con sustituto reducido), xovmp (punto de cruce múltiple), xovsh (mezcla aleatoria), xovshrs (cruce aleatorio con sustituto

reducido). Adicionalmente la tasa de cruzamiento se establece entre los valores desde 0 hasta 1 (0% hasta 100%). De similar forma como se procedió con la etapa de selección, para el cruzamiento también se emplean funciones predefinidas de Matlab.

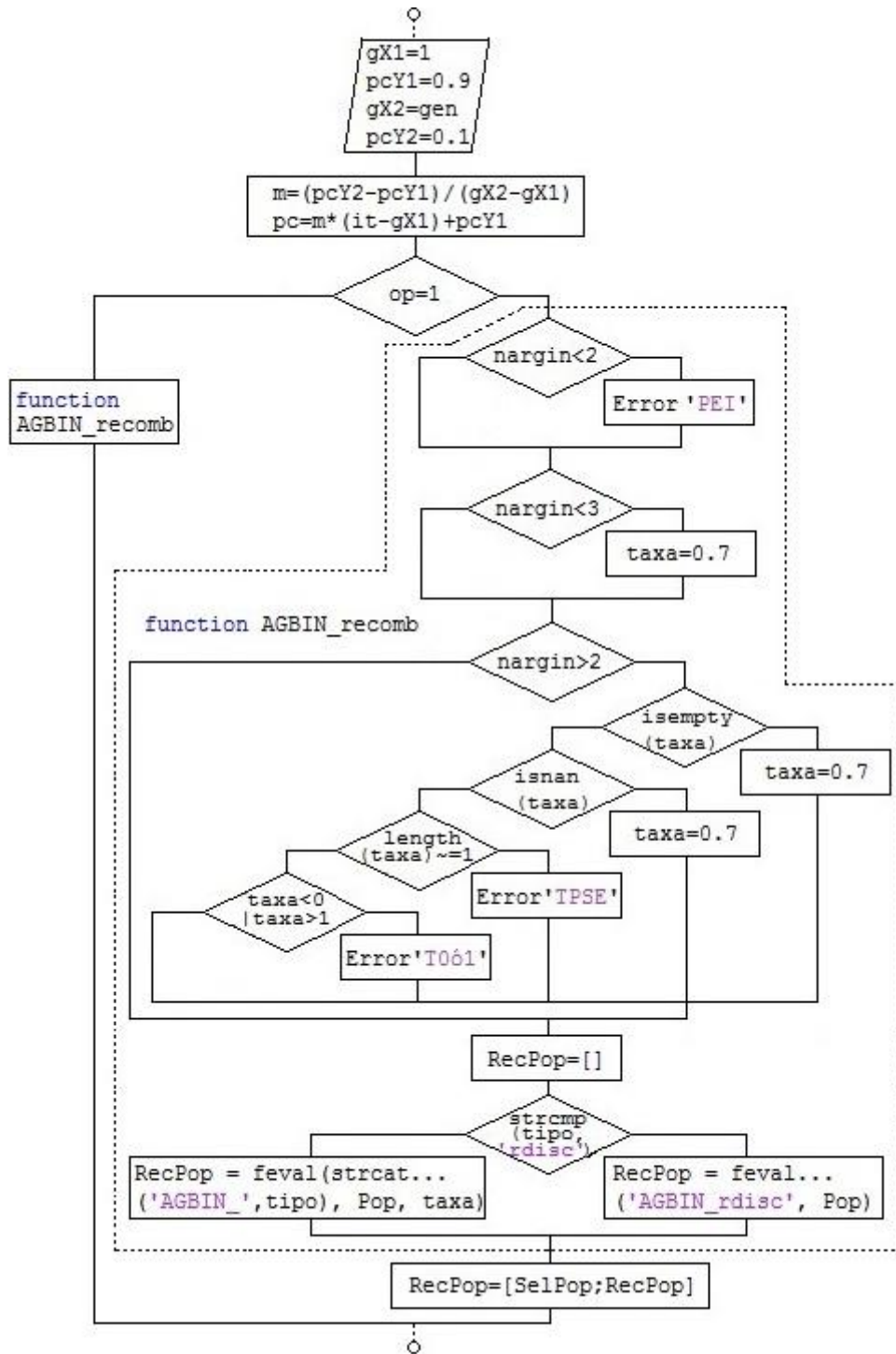


Figura 25: Método de cruzamiento.
Elaborado por Autoría.

Proceso de Mutación: para finalizar y dar surgimiento a la nueva población, se aplica la mutación del cromosoma como se muestra en la Figura 26, donde se puede observar que se emplea una mutación de genes de población con representación binaria, gracias al uso de la función *AGBIN_MUT*, que hace mutar a un gen en la población con la probabilidad *prob_mut*, devolviendo una matriz de población mutada. Si muta, el valor del gen asume el valor 1 si originalmente era 0 y viceversa, cabe indicar que el proceso solo es aplicable a codificación binaria.

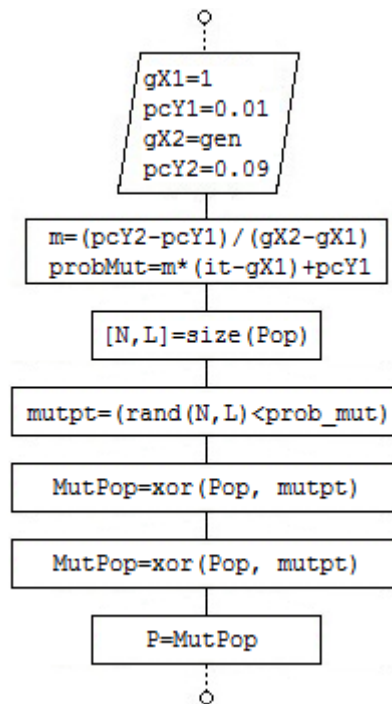
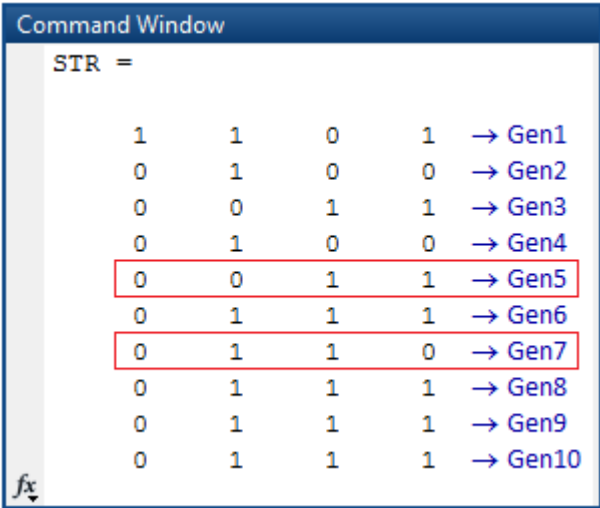


Figura 26: Método de mutación.
Elaborado por Autoría.

Así se completa el proceso de optimización para la primera generación, ahora se incrementa en uno la variable iteración que representa el número de generaciones, y así nuevamente comienza el ciclo, pero ahora ya con la población evolucionada en lugar de la población inicial. En vista que los resultados de cada generación se van almacenando en una matriz, cada vez que se cumpla el ciclo, se realizará las comparaciones pertinentes y se ira escogiendo los mejores resultados que satisfagan a la FO, para cuando se alcance el número máximo de generaciones, finalmente obtener las soluciones recomendables que determinan la localización óptima de reconectores dentro del AMV de prueba.

2.4.7 Resultados obtenidos.

Después de todo éste proceso llevado a cabo, llega el momento cumbre para dar una respuesta al planteamiento del problema de un inicio, mediante la interpretación de los resultados generados por el software Matlab, la matriz donde se van almacenando las combinaciones resultantes para cada una de las generaciones es la denominada [STR], como se indica en la Figura 27, que es la base para la evaluación del valor máximo de la FO, es decir los puntos más óptimos a ubicar los RA en la red eléctrica, son aquellos donde se tiene un dígito uno. Desde la generación uno hasta la generación siete, el algoritmo de optimización continúa probando recombinaciones basado en encontrar el máximo de la FO, a partir de la generación ocho hasta la generación diez la FO empieza a presentar combinaciones repetitivas, hasta que se cumple las iteraciones establecidas y presenta las combinaciones para la localización óptima (conjunto de soluciones), la generación cinco y generación siete corresponde a la solución buscada, pues presentan el mismo valor óptimo para la FO (ver Figura 28), pero con la diferencia que únicamente son necesarios dos RA para instalar en el AMV, obteniendo así el menor costo posible.



```
Command Window
STR =
    1     1     0     1 → Gen1
    0     1     0     0 → Gen2
    0     0     1     1 → Gen3
    0     1     0     0 → Gen4
    0     0     1     1 → Gen5
    0     1     1     1 → Gen6
    0     1     1     0 → Gen7
    0     1     1     1 → Gen8
    0     1     1     1 → Gen9
    0     1     1     1 → Gen10
```

Figura 27: Combinaciones de localizaciones óptimas.
Elaborado por Autoría.

Mientras en la matriz [RECO] almacena el progreso de mejoramiento de la FO, hasta llegar a su valor más alto, que pasa a convertirse en los puntos óptimos de localización a instalar los RA (ver Figura 28), y éste vienen acompañado del número de posición de la combinación binaria que alcanzó el máximo valor

dentro de la población. Desde la generación uno hasta la generación cuatro, el algoritmo de optimización continúa probando recombinaciones basado en encontrar el máximo de la FO, a partir de la generación cinco hasta la generación diez la FO empieza a estabilizarse, hasta que finalmente cumple las iteraciones establecidas y alcanza el máximo valor de la FO siendo el valor 0,8667.

FO Value	Iteration Count	Generation
0.8388	5.0000	→ Gen1
0.8490	2.0000	→ Gen2
0.8490	1.0000	→ Gen3
0.8626	1.0000	→ Gen4
0.8667	1.0000	→ Gen5
0.8667	9.0000	→ Gen6
0.8667	1.0000	→ Gen7
0.8667	1.0000	→ Gen8
0.8667	1.0000	→ Gen9
0.8667	1.0000	→ Gen10

Figura 28: Optimización de la FO.
Elaborado por Autoría.

La representación de la solución propuesta en el AMV de prueba, se lo hace a través de estas dos matrices, para ello se traslada los resultados obtenidos al diagrama unifilar IEEE de 12 barras, donde se garantiza la mejora de confiabilidad al menor costo posible, pues se está usando únicamente el equipamiento estrictamente necesario. Para el caso en estudio, se tiene la posibilidad de seleccionar la solución entre dos opciones: Generación cinco y Generación siete, quedando a responsabilidad del diseñador la toma de la decisión final, analizando aspectos como: traslados, cargas especiales, puntos de acceso a comunicación, estado actual de las instalaciones, perturbaciones de tensión; para representar la solución óptima se va a considerar la sobretensión, por ello se opta por la solución propuesta por la Generación Siete que desconecta RA de forma alternada en los ramales y no solo al final del circuito, presentando posibles sobre voltajes para los usuarios ubicados al inicio del circuito, dicha solución se muestra en la Figura 29.

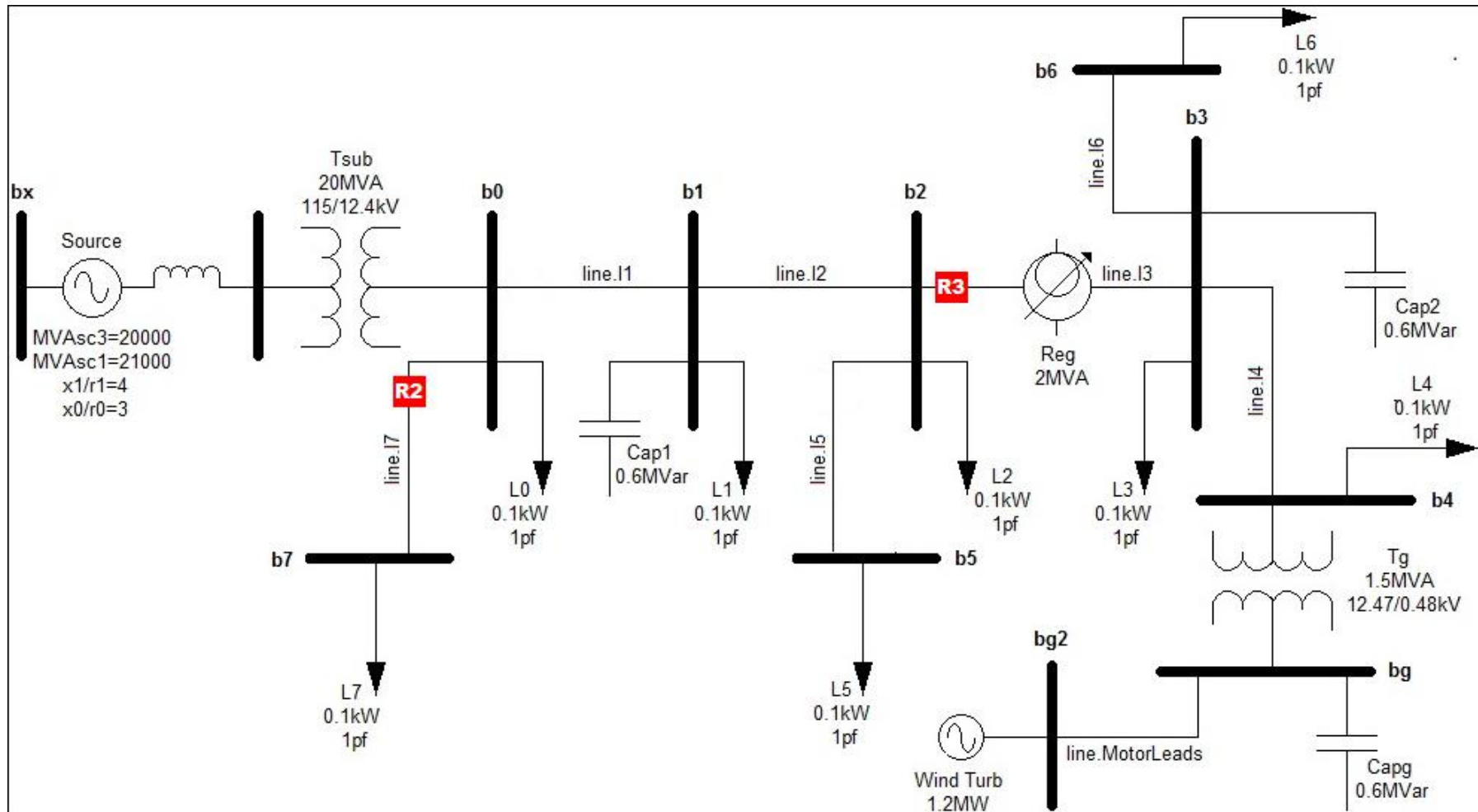


Figura 29: Localización óptima de RA en circuito de prueba IEEE 12 barras.
Elaborado por Autoría.

2.5 Conclusiones.

- El AMV de prueba para realizar la evaluación del algoritmo desarrollado, aunque desde un inicio estaba garantizada su validez por tratarse de un red IEEE de 12 barras, sin embargo, sorprendió que pese a su pequeño porte, no le quita la complejidad de un alimentador real de MV, pues ésta contiene todos los componentes de red típicos de los SED, permitiendo conocer el proceso para el modelamiento de cada uno de los componentes y dentro de éstos los parámetros necesarios que se deben introducir para obtener una buena simulación; con lo cual se facilita a futuro el modelamiento de los AMV reales y así poder determinar la localización óptima de los RA en sus redes eléctricas.
- El desarrollo del AG permitió conocer el funcionamiento de cada una de sus etapas, en la selección se escogió la más recomendada por la literatura, permitiendo obtener buenos resultados, gracias a la aleatoriedad que maneja y la gran selectividad para el escogimiento de los padres más fuertes que darán paso a la nueva generación. Para el cruzamiento se utilizó la recombinación discreta, es decir elegir entre dos valores, adicional el cruzamiento maneja una probabilidad alta de actuación sobre cada pareja de padres a cruzar. La mutación por el contrario se aplica con una probabilidad muy baja de actuación sobre cada descendiente obtenido tras aplicar el operador de cruce, pero es un paso necesario, pues evita que el algoritmo se quede atrapado en alguna solución ineficaz.
- Los software OpenDSS y Matlab cumplieron con las expectativas iniciales, el software OpenDSS al tratarse una arquitectura abierta, brinda la posibilidad de reutilización de códigos ya desarrollados por investigadores previos, permitiendo trabajar sobre ellos y realizar los ajustes necesarios de acuerdo a la nueva realidad, también por incluir dentro de sus librerías herramientas gráficas sencillas pero muy útiles, hacen que la aplicación presente un rendimiento eficaz, y si a eso se le suma que la configuración de cada uno de los elementos que conforman el SED se lo hace exclusivamente solo a través de script, con respecto a otras aplicaciones que hasta utilizan interfaces gráficas para modelar los SED,

sin lugar a dudas la velocidad de procesamiento y convergencia de la información son bastantes satisfactorias. El software Matlab por tratarse de una herramienta avanzada y muy conocida dentro de la ingeniería, no requiere de mucha referencias; sin embargo fue grato conocer que dentro de sus librerías se incluye funciones propiamente para el desarrollo de AG, que para este caso en particular resultaron de gran ayuda para la implementación de la solución.

- La investigación al estar los índices de confiabilidad en relación inversa a la FO, al maximizar ésta última los indicadores SAIDI y SAIFI por su lado presentan una disminución significativa de sus respectivos valores, donde se está hablando del al menos un 50% de nivel de mejora, sí se comparan los índices al inicio de la metodología versus sus pares al final del proceso, lo que representa en números una reducción por arriba de cincuenta eventos de falla con una duración por ejemplo de veinte horas cada uno. Con lo cual queda evidenciado los beneficios a obtener, una vez que la metodología sea puesta en marcha.

3 CAPITULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1 Análisis de los resultados.

Una vez seguida la metodología descrita en el Capítulo II, es hora de un análisis de resultados, que permitan validar la solución propuesta a la problemática inicial, que fue la localización óptima de RA en un AMV, basados en la mejora de la confiabilidad del SED; para lo cual se considera apropiado ir examinando los productos que arrojan cada uno de los software empleados, como son: Matlab y OpenDSS.

3.1.1 Resultados software Matlab.

Tabla 9: Cálculos del índice SAIDI.

SAIDI	Población							
	01	02	03	04	05	06	07	08
01	2.6	2.6	2.6	2.5	0.8	2.0	2.5	2.5
02	3.1	2.5	2.5	0.8	2.5	2.5	0.8	0.2
03	3.1	0.8	2.5	2.5	0.1	0.7	0.7	2.5
04	0.7	0.8	2.5	0.1	0.7	0.7	0.1	3.1
05	0.7	0.7	0.1	0.8	0.8	0.7	0.1	0.0
06	0.1	0.7	0.8	0.1	0.7	0.7	0.7	0.7
07	0.7	0.1	0.1	0.7	0.1	0.7	0.7	0.7
08	0.7	0.7	0.1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.1
09	0.7	0.7	0.1	0.7	0.7	0.7	0.1	0.0
10	2.5	0.7	0.2	0.7	0.7	0.7	0.1	0.7

Elaborado por Autoría.

El software MATLAB al ser el encargado de llevar a cabo el desarrollo del algoritmo de optimización, se procede al análisis de los índices de confiabilidad para cada una de las poblaciones y generaciones, en la Tabla 9 se puede apreciar cómo va cambiando el índice SAIDI con la finalidad de ir reduciendo la duración de interrupciones en cada ciclo.

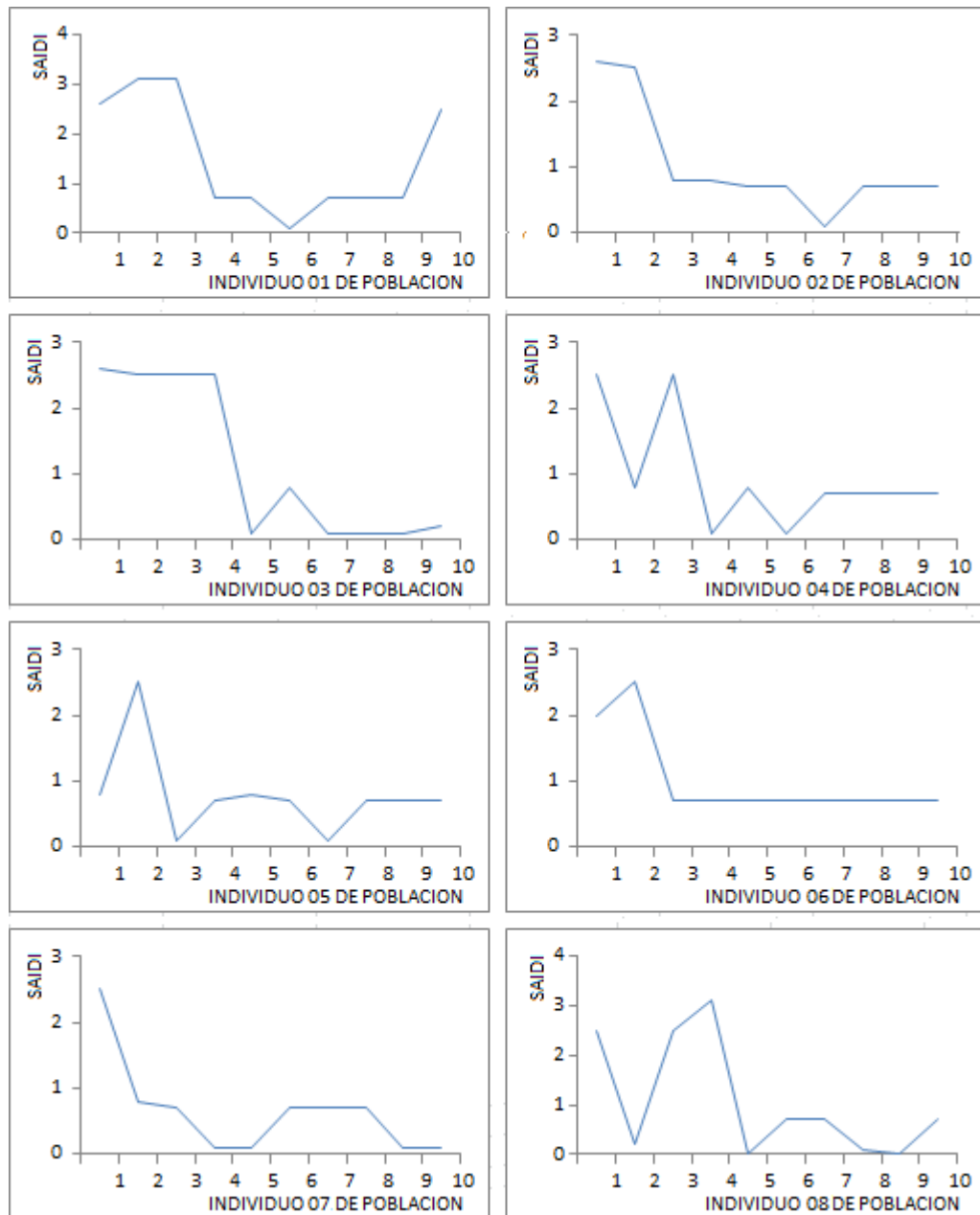


Figura 30: Comportamiento del SAIDI en cada individuo de la población.

Elaborado por Autoría.

En la Figura 30, se observa como el índice SAIDI presenta siempre la tendencia a reducir su valor de duración de las interrupciones, a medida que las generaciones

avanzan en cada uno de los individuos de la población, lo que permitirá finalmente un mejoramiento de la confiabilidad del SED.

Mientras tanto en la Tabla 10 se puede apreciar cómo va cambiando el índice SAIFI con la finalidad de ir reduciendo el número de interrupciones en cada ciclo.

Tabla 10: Cálculos del índice SAIFI.

SAIFI	Población							
	01	02	03	04	05	06	07	08
01	0.93	0.93	0.93	0.89	0.27	0.73	0.89	0.89
02	1.09	0.89	0.89	0.27	0.89	0.89	0.27	0.07
03	1.09	0.27	0.89	0.89	0.03	0.23	0.23	0.89
04	0.23	0.27	0.89	0.03	0.23	0.23	0.03	1.09
05	0.23	0.23	0.03	0.27	0.27	0.23	0.03	0.00
06	0.03	0.23	0.27	0.03	0.23	0.23	0.23	0.23
07	0.23	0.03	0.03	0.23	0.03	0.23	0.23	0.23
08	0.23	0.23	0.03	0.23	0.23	0.23	0.23	0.03
09	0.23	0.23	0.03	0.23	0.23	0.23	0.03	0.00
10	0.89	0.23	0.07	0.23	0.23	0.23	0.03	0.23

Elaborado por Autoría.

En la Figura 31, se observa como el índice SAIFI presenta siempre la tendencia a reducir su valor de frecuencia de las interrupciones, a medida que las generaciones avanzan en cada uno de los individuos de la población, lo que permitirá finalmente un mejoramiento de la confiabilidad del SED.

Con lo cual se está consiguiendo la localización óptima de RA, basados en los criterios de confiabilidad, pues mientras el valor de los índices se menor, el SED estará cumpliendo con su objetivo de brindar al usuario final un servicio eléctrico de forma continua y de calidad. Así mismo se estaría alcanzando con las metas anuales establecidas y con ello evitando la aplicación del regimen sancionatorio emita por el ente de control (ARCERNNR 002/20).

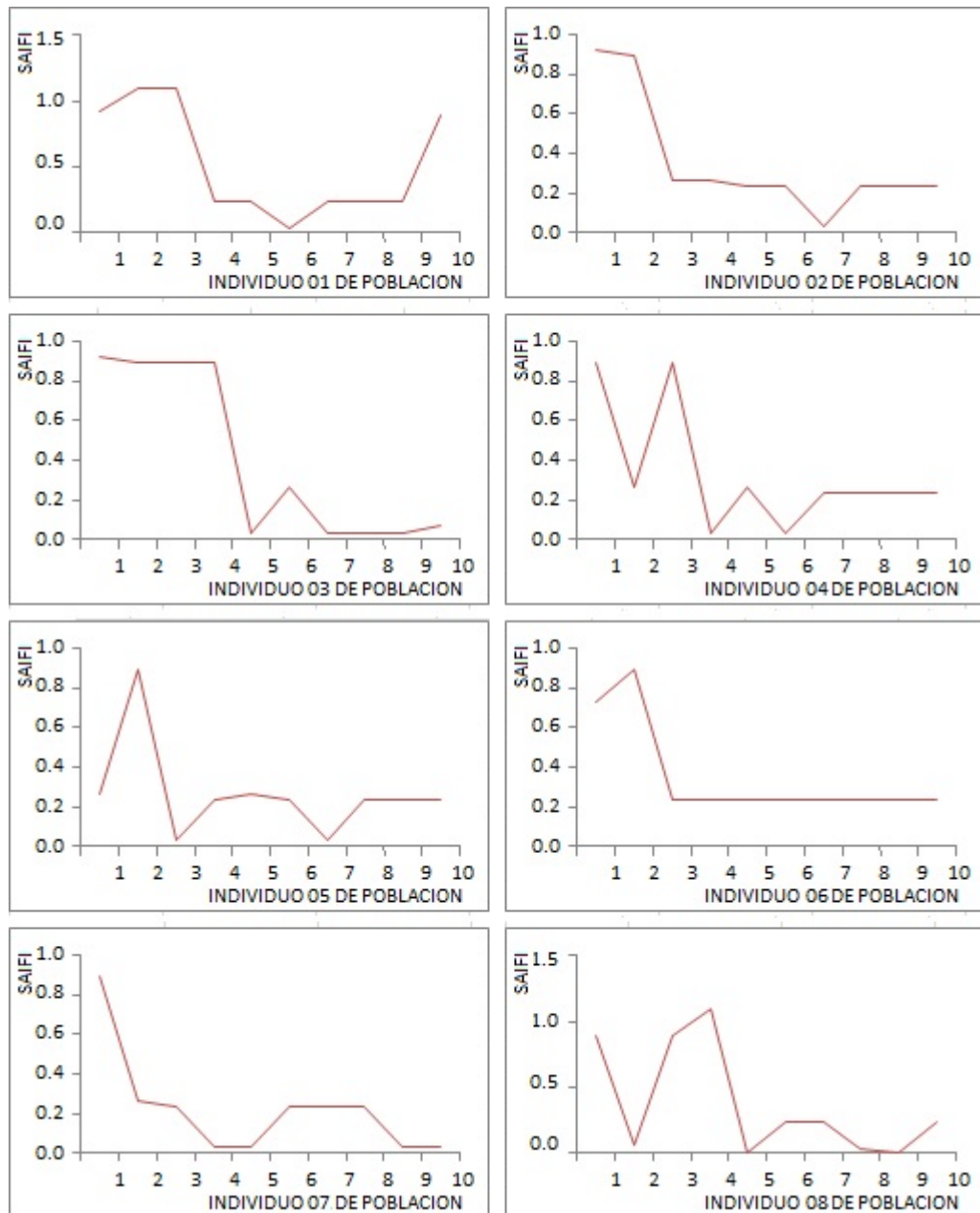


Figura 31: Comportamiento del SAIIFI en cada individuo de la población.

Elaborado por Autoría.

La Figura 32 y Figura 33 representan el efecto que tiene el algoritmo de optimización sobre los índice de confiabilidad SAIDI y SAIIFI, para lo cual se calculó a estos índices el valor promedio de la población en cada una de las generaciones, para determinar cual es su tendencia, al ir ejecutandose las iteraciones en base a la FO, la metodología siempre busca el mejor camino para ir reduciendo el valor de los índices de confiabilidad, en caso que no ocurra aquello, internamente el algoritmo abandona ese trayecto y ópta por otro camino que

permita seguir mejorando los índices de confiabilidad. En vista que la FO rige la valoración cuantitativa de las soluciones, tanto para el SAIDI como el SAIFI, las gráficas mostradas resultan muy similares, diferenciándose principalmente en sus escalas.

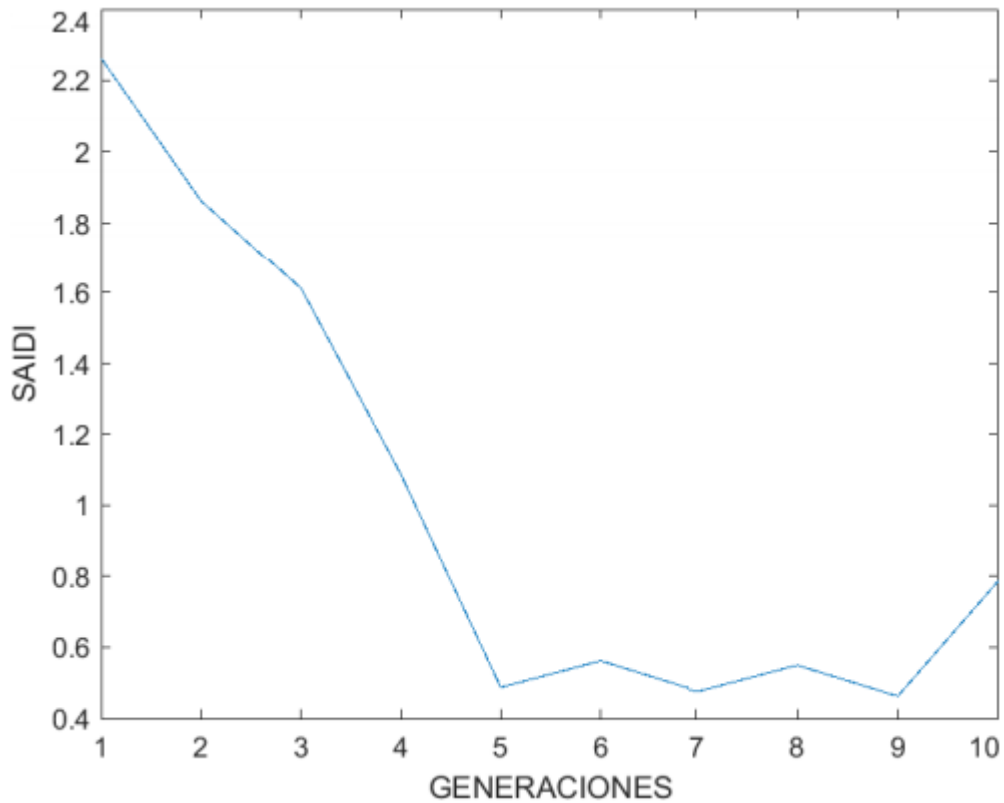


Figura 32: Reducción del índice SAIDI.
Elaborado por Autoría.

Una forma de valorar el mejoramiento de los índices de confiabilidad, es través de una comparación porcentual a partir desde cuando empieza el proceso de optimización, frente a los valores registrados una vez que el proceso haya concluido; en lo que se refiere al índice SAIDI en la Figura 32 se puede observar que su valor de inicio es de 2.26 horas/cliente, al cual se lo asume como 100% de afectación al AMV, lo que genera que la mejora sea del 0%; a medida que el algoritmo va ejecutando las iteraciones, tanto la afectación como la mejora van cambiando, en la mayoría de los casos la afectación tiende a reducirse, mientras la mejora tiende a incrementarse; sin embargo también puede resultar que de una generación a otra el comportamiento de la afectación y mejora sean lo opuesto, en cuyos casos el algoritmo trata nuevamente de retomar el objetivo buscado, consiguiéndolo en una o dos generaciones posteriores.

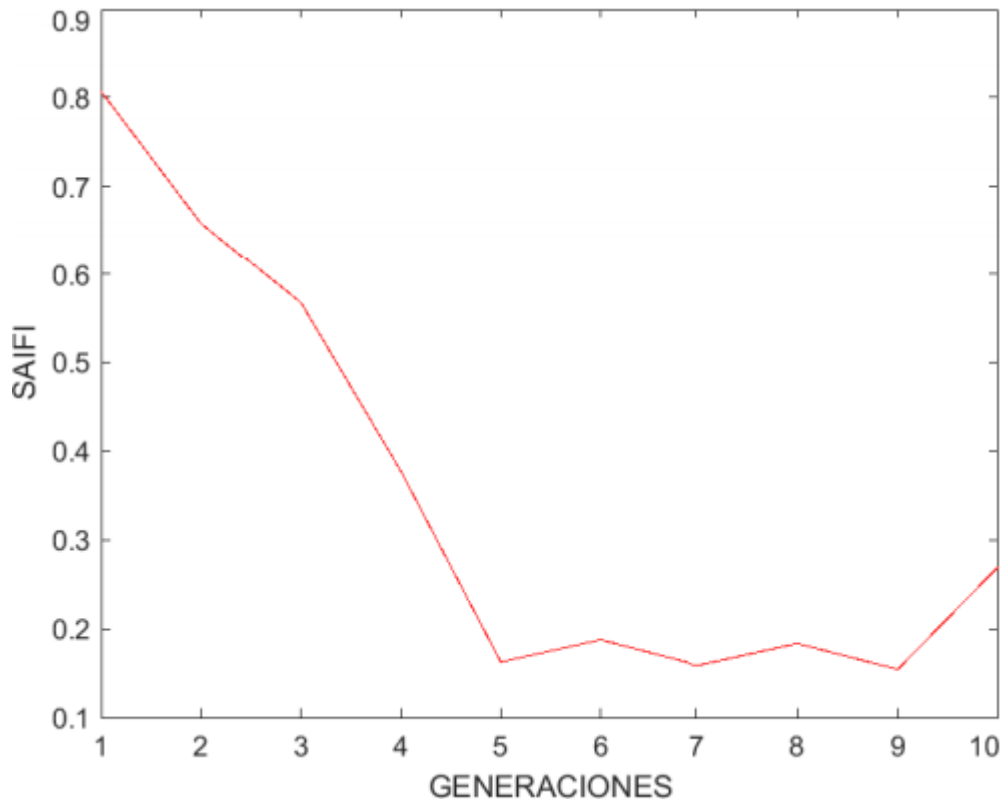


Figura 33: Reducción del índice SAIFI.
Elaborado por Autoría.

En vista que finalmente se seleccionó la combinación siete del conjunto de soluciones halladas como la más óptima, se puede observar en la Tabla 11 que la mejora que se pretende conseguir es del 79%, reduciéndose el índice SAIDI a 0.48 horas/cliente. Sin embargo el mayor porcentaje de mejora es del 80%, pero esta solución involucra la instalación de un RA adicional y que por los costos que éste representa, el índice SAIDI no refleja una mejora considerable, por ello se decide mantener con la solución de la combinación correspondiente a la generación número siete.

Tabla 11: Mejora porcentual del índice SAIDI.

Generación	SAIDI	Afectación	Mejora
01	2.26	100%	0%
02	1.86	82%	18%
03	1.61	71%	29%
04	1.09	48%	52%
05	0.49	22%	78%
06	0.56	25%	75%
07	0.48	21%	79%
08	0.55	24%	76%
09	0.46	20%	80%
10	0.79	35%	65%

Elaborado por Autoría.

Referente al índice SAIFI en la Figura 33 se puede observar que su valor de inicio es de 0.81 interrupciones por cliente por año, al cual se lo asume como 100% de afectación al AMV, lo que genera que la mejora sea del 0%; a medida que el algoritmo va ejecutando las iteraciones, tanto la afectación como la mejora van cambiando, en la mayoría de los casos la afectación tiende a reducirse, mientras la mejora tiende a incrementarse; sin embargo también puede resultar que de una generación a otra el comportamiento de la afectación y mejora sean lo opuesto, en cuyos casos el algoritmo trata nuevamente de retomar el objetivo buscado, consiguiéndolo en una o dos generaciones posteriores.

En vista que finalmente se seleccionó la combinación siete del conjunto de soluciones halladas como la más óptima, se puede observar en la Tabla 12 que la mejora que se pretende conseguir es del 80%, reduciéndose el índice SAIFI a 0.16 interrupciones por cliente por año. Sin embargo el mayor porcentaje de mejora es del 81%, pero esta solución involucra la instalación de un RA adicional y que por los costos que ésto representa, el índice SAIFI no refleja una mejora considerable, por ello se decide mantener con la solución de la combinación correspondiente a la generación número siete.

Tabla 12: Mejora porcentual del índice SAIFI.

Generación	SAIFI	Afectación	Mejora
01	0.81	100%	0%
02	0.66	82%	18%
03	0.57	70%	30%
04	0.38	47%	53%
05	0.16	20%	80%
06	0.19	23%	77%
07	0.16	20%	80%
08	0.18	23%	77%
09	0.15	19%	81%
10	0.27	33%	67%

Elaborado por Autoría.

Adicionalmente una forma de saber que la optimización va por buen camino es relacionar el valor máximo de la FO con el valor medio de cada generación, según avanzan las iteraciones los individuos de la población van mejorando, por lo tanto la gráfica del valor medio debe mostrar tendencia hacia el valor máximo, tal cual como se muestra en la Figura 34.

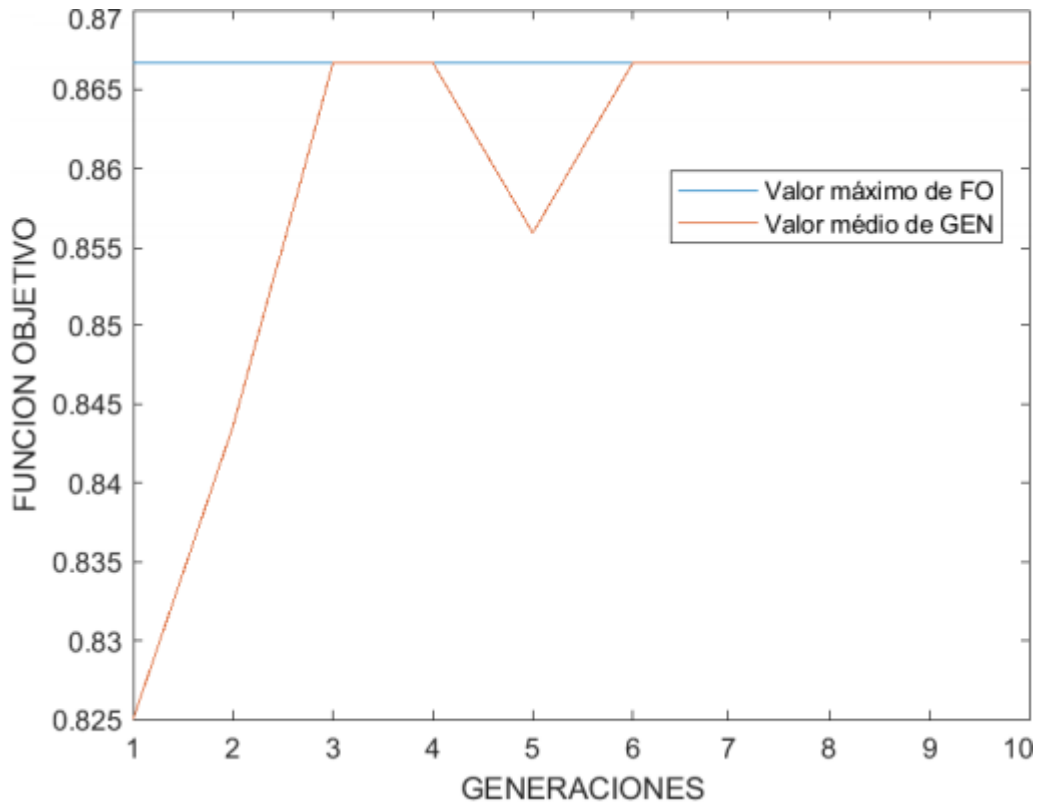


Figura 34: Relación de tendencia del valor máx. FO y valor medio de generación.
Elaborado por Autoría.

También se comprueba de manera gráfica los diferentes valores de población de la FO máxima, la forma de cómo se va proponiendo las posibles combinaciones del conjunto de soluciones, cabe indicar que el valor que se representa en la Figura 35, en su equivalente en el sistema decimal.

En la Tabla 13 se puede observar la matriz de la FO generada para cada uno de los individuos de la población en la generación *it*, se puede apreciar como el valor de FO va tomando diferentes valores en busca de obtener el máximo valor de la FO; una vez que se dispone de todos los valores de FO se procede a calcular el valor máximo para cada una de las generaciones, de similar forma se procede para extraer el valor medio de la FO.

Es muy pertinente realizar la siguiente acotación, la FO definida mantienen una relación inversamente proporcional con respecto a sus variables: COSTO, SAIFI, SAIDI, lo cual se puede entender claramente al observar la Figura 17, Figura 18 y Figura 19 respectivamente. En ellas se aprecia que cuando mayor sea el valor del COSTO, SAIFI o SAIDI los factores de normalización correspondientes van

decrementando su valor, desde uno hasta cero, haciendo que la FO también disminuya, por ello es que se determinó MAXIMIZAR a la FO para encontrar su valor óptimo.

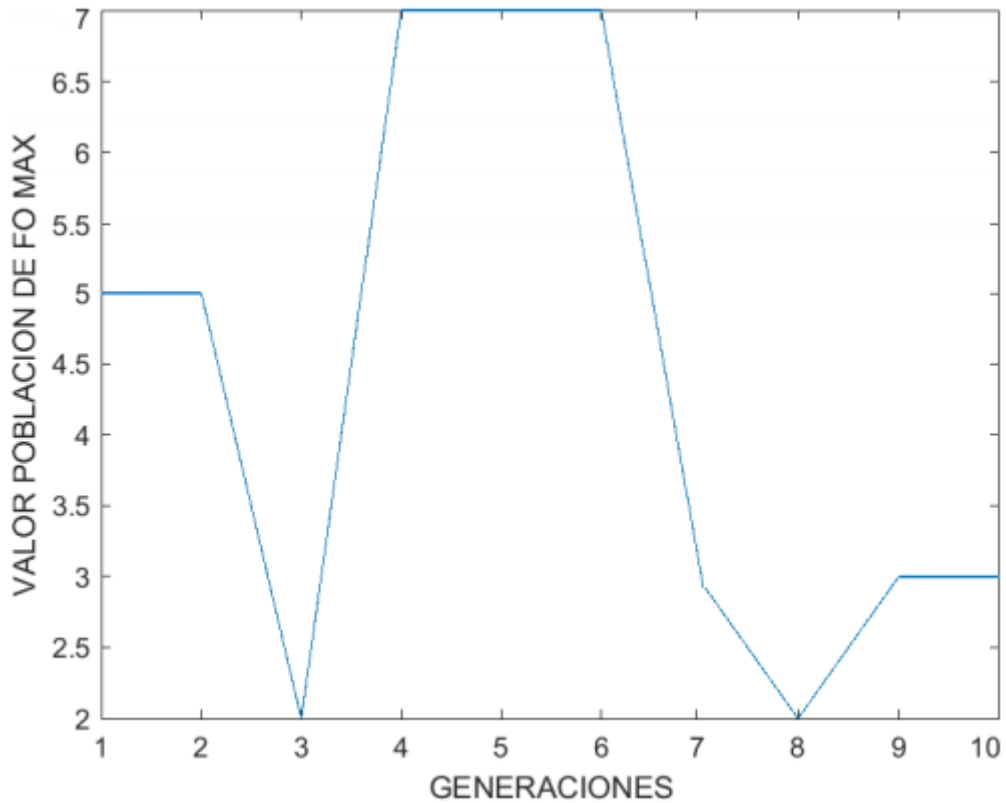


Figura 35: Variación de la población de FO máx.
Elaborado por Autoría.

Tabla 13: Espacio total de la FO.

FO	Población								Máximo	Promedio	
	01	02	03	04	05	06	07	08			
Generación	01	0.8667	0.7752	0.8667	0.8095	0.8667	0.7392	0.8667	0.8095	0.8667	0.8250
	02	0.8667	0.8095	0.8667	0.8667	0.7392	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8436
	03	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667
	04	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667
	05	0.8667	0.7810	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8560
	06	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667
	07	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667
	08	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667
	09	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667
	10	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667	0.8667

Elaborado por Autoría.

3.1.2 Resultados software OpenDSS.

Por otro lado el software OpenDSS al ser el encargado del modelamiento y simulación, permite conocer el comportamiento del flujo de potencia, así como la representación gráfica del diagrama esquemático del circuito de prueba IEEE 12 barras, como se puede observar en la Figura 36.

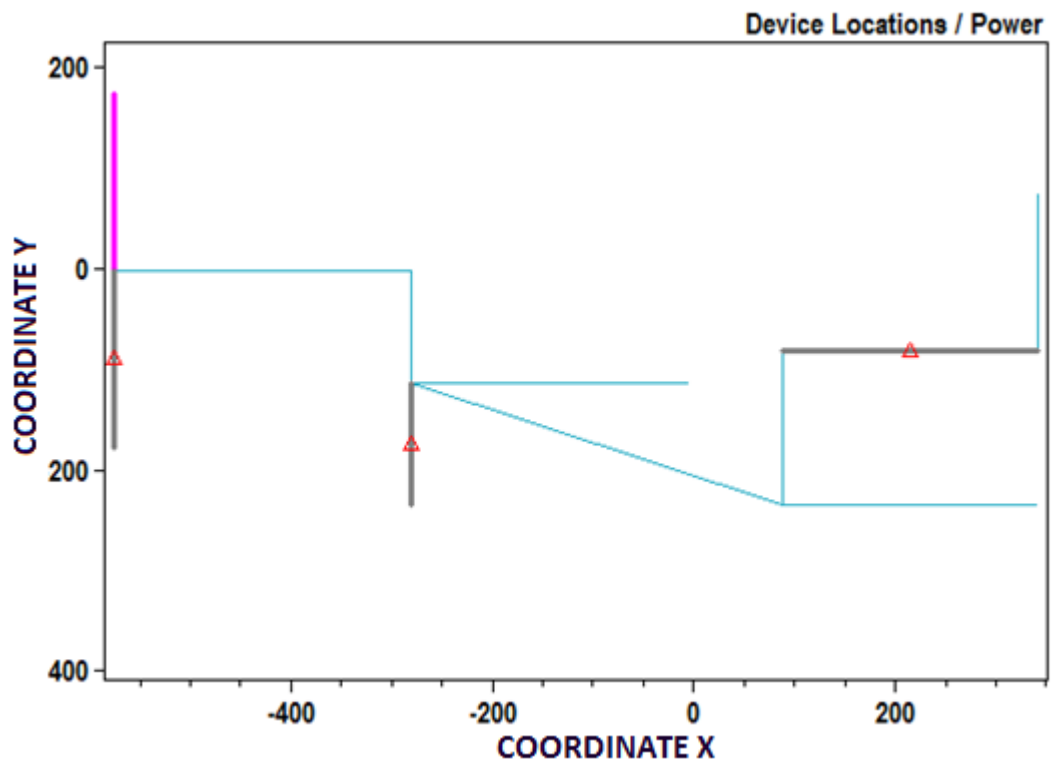


Figura 36: Solución óptima de localización de RA.

Elaborado por Autoría.

Ahora bien, gracias a los monitores instalados en el circuito eléctrico, se puede conocer el comportamiento de varias variables, al momento de aplicar una falla única de línea a tierra (SLG), la misma se produce al transcurrir 0.3 segundos de iniciar la simulación. El monitor está instalado sobre la Línea 1 y hasta antes de la falla los voltajes F-N (7199 V), se encuentran sobre su valor nominal, una vez producida la falla la fase afectada decrece por debajo de su valor nominal, hasta que después de 0.1 segundo las protecciones aíslan una de las fuentes de alimentación, como lo es el motor de inducción, lo que produce que el sistema continúe operando pero solo con una fase, pues las dos restantes presentan falla permanente, tal cual como se muestra en la Figura 37 y se requiere de la revisión de las causas de la falla, su mantenimiento respectivo y la posterior restauración de servicio.

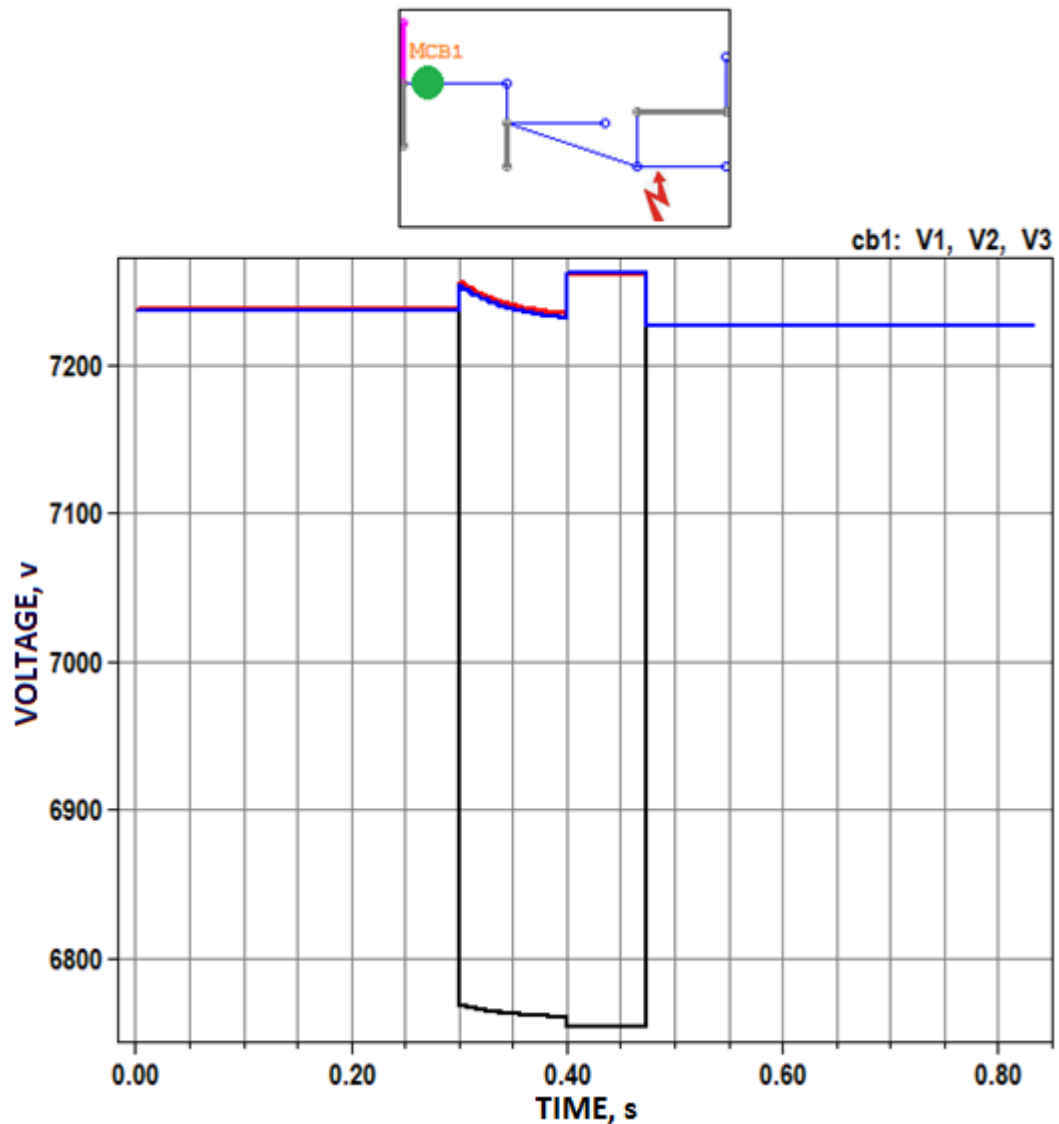


Figura 37: Voltajes F-N ante una SLG en CB1.
Elaborado por Autoría.

Para las mismas circunstancias descritas anteriormente, en la Figura 38 se puede observar el comportamiento de las corrientes por fase, la falla produce que la fase involucrada incremente su valor en un 900% aproximadamente, una vez que se produce el aislamiento del motor de inducción, solo una de las fases continua operando con una reducción en su magnitud, posiblemente debido a la desconexión de las cargas bifásicas y trifásicas.

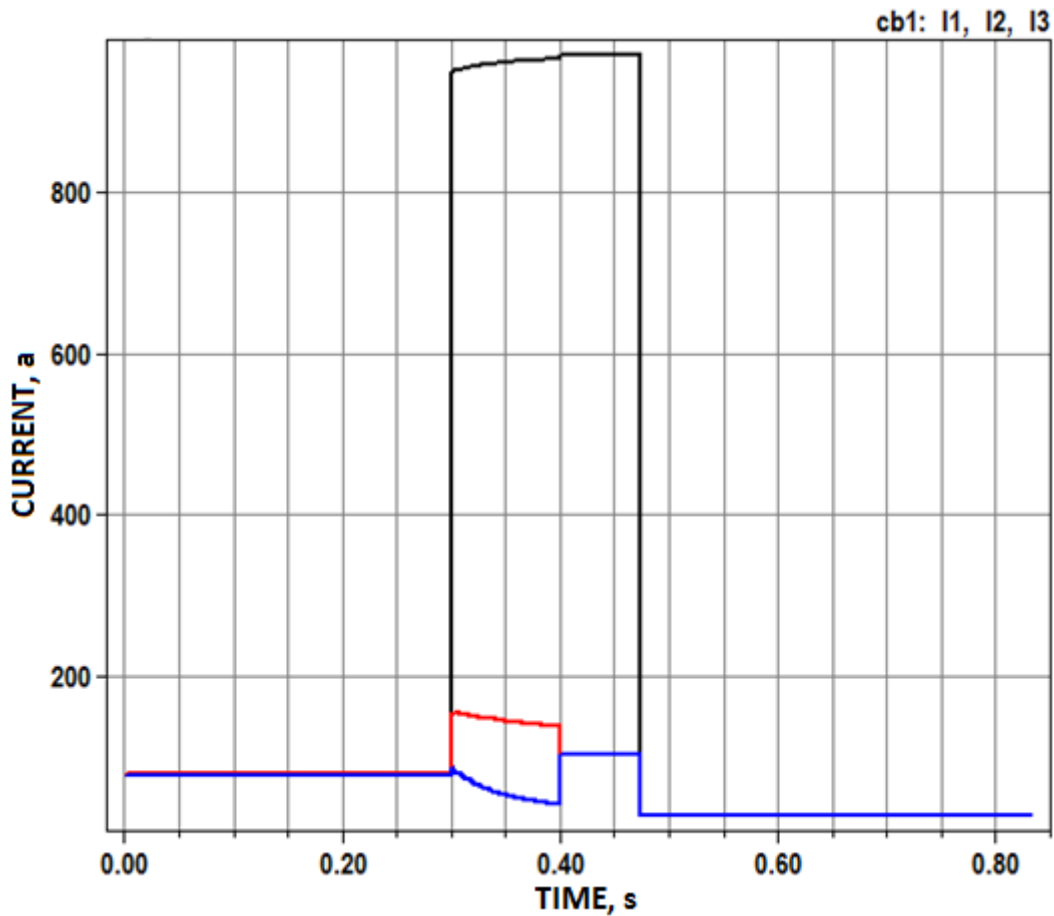


Figura 38: Corrientes ante una SLG en C1.
Elaborado por Autoría.

En el diagrama esquemático también se puede configurar para divisar y categorizar según el nivel de voltaje, después de la ocurrencia de la falla, así para voltajes arriba de 1.02 pu se muestran las líneas de distribución en color Azul, para voltajes entre 1.00 y 1.02 pu se muestran en color Verde y para voltajes por debajo de 1.00 pu se colocan de color Rojo, como se muestra a continuación en la Figura 39.

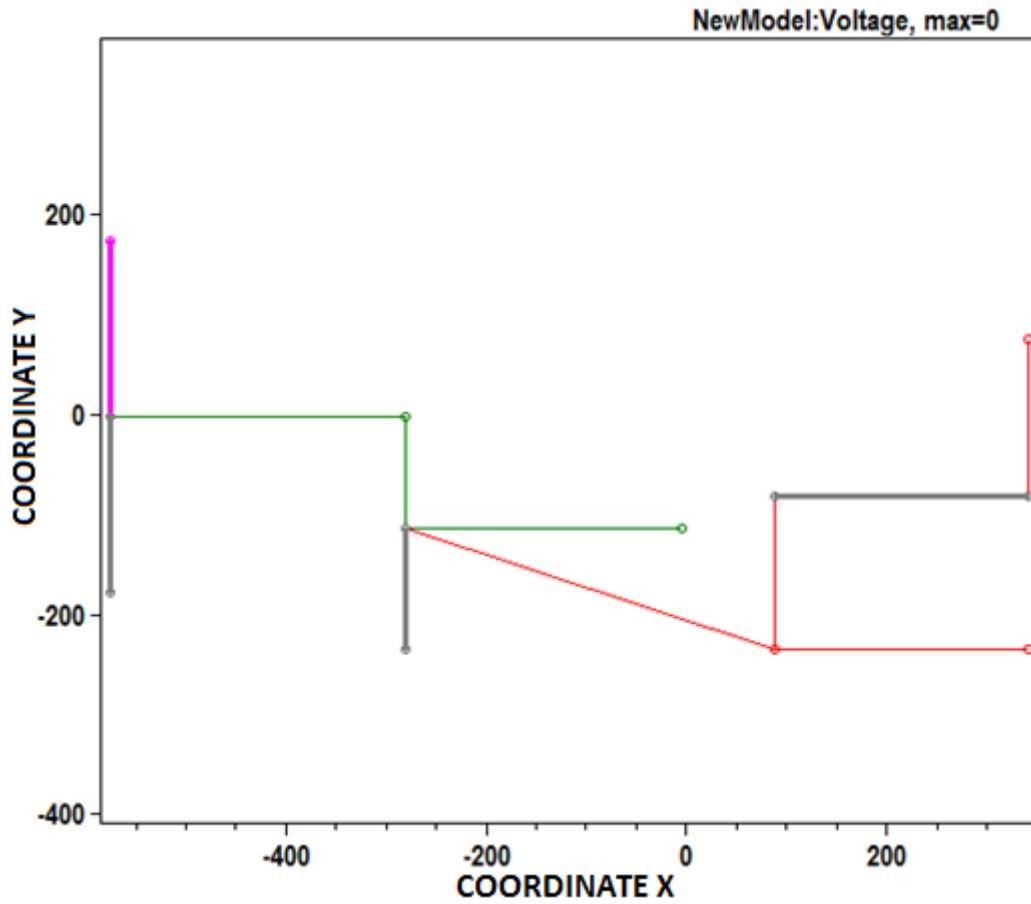


Figura 39: Coloreado según nivel de voltaje.
Elaborado por Autoría.

3.2 Validación técnica - económica de los resultados.

La presente investigación se desarrolló una vez que se seleccionó la metodología más adecuada para encontrar una solución al problema planteado, por tratarse de una optimización la literatura especializada recomienda hacer uso de los Algoritmos Genéticos, por tratarse de técnicas que pueden ser programadas de acuerdo a las necesidades del investigador, y que consisten en imitar varios comportamientos del entorno que nos rodea, evolución biológica. La técnica aplicada brinda la posibilidad de disponer de varias soluciones de forma simultánea, obteniéndose buenos resultados. Para aplicar los AG se tuvo en consideración la delimitación del espacio de búsqueda, caso contrario el tiempo de convergencia puede ser demasiado o simplemente no converger, por ello al momento de ingresar los datos de entrada se sugiere tomar en cuenta los valores máximos que se pueden ingresar, sin que ello signifique que no se pueda ingresar valores más altos, pero de acuerdo a las pruebas realizadas, no se logra una mejor

optimización, ya que los resultados se vuelven repetitivos, generando un óptimo local.

La definición de la función objetivo para cuantificarla y evaluarla cumple con la finalidad deseada, las respuestas encontradas por la codificación implementada son fáciles de interpretar desde el lenguaje de máquina. Tanto el costo como los indicadores de confiabilidad resultaron suficientes para la estructuración de la función objetivo, sin que esto limite la posibilidad de agregar más variables o restricciones, de acuerdo a los requerimientos que se establezcan en las Empresas de Distribución Eléctrica.

Gracias a que el software OpenDSS cuenta entre sus propiedades, con el cálculo de confiabilidad, dentro del cual se encuentran los indicadores SAIDI y SAIFI, permitió que el desarrollo del AG se lo haga en función de estos parámetros junto con la variable COSTO que también es importante considerar, al inicio trabajar sobre esta plataforma puede ser un poco ambiguo, ya que únicamente se configura mediante script sin ninguna interfaz gráfica, más tarde este aspecto más que una desventaja resultó un beneficio, pues el rendimiento de ejecución resulta muy bueno; si a eso se le suma que los sistemas de distribución son muy semejantes ya que funcionan bajo el mismo principio, la configuración de los componentes pueden ser reutilizados con ligeras modificaciones en muchos casos, así como el soporte de ayuda resulta muy preciso y útil ante cualquier duda que se presente.

Por su lado el software Matlab al tratarse de una aplicación avanzada, se la pudo explotar de acuerdo a los requerimientos presentados por la Optimización, en la programación en sí, se trasladó los procesos señalados en el Capítulo II, codificándolos al lenguaje de máquina, gracias a los conocimientos de programación que se tiene. Adicionalmente fue grato conocer que Matlab cuenta con funciones dedicadas al tratamiento de Algoritmos Genéticos, los cuales resultaron de gran utilidad para desarrollar las etapas de Selección, Cruzamiento y Mutación de los individuos de la población.

En la actualidad los RA se han convertido en un equipamiento imprescindible dentro de las redes eléctricas de distribución, por la doble funcionalidad que presentan, para protección ante fallas temporales permitiendo una rápida

restitución del servicio eléctrico y para el corte ante fallas permanentes, permitiendo el aislamiento de la falla, impidiendo que ésta produzca afectación aguas arriba; ahí es donde radica su importancia por conocer la localización más adecuada donde se deban instalar éstos equipos, basado en un estudio que refleja las características y realidades propias del AMV, que se desea implementar en sus redes la instalación de reconectores. Los reconectores al contar con enlaces de comunicación, brindan la posibilidad de ser integrados al SCADA que se encuentran en los Centros de Operación y Control de cada una de las Empresas de Distribución, consiguiendo así el monitoreo y control remoto, reduciendo aún más los tiempos de restitución de servicio eléctrico, lo que se traduce en una mejora de la confiabilidad y una mayor satisfacción al usuario final, que no tendrá pérdidas económicas por interrupción en sus actividades comerciales e industriales.

Así mismo el beneficio lo apreciará la Empresa Distribuidora, al tener una disminución en la energía no suministrada, que se refleja en una mayor facturación, recursos que pueden ser utilizados en el mismo SED para la implementación de nuevas mejoras que permitan aproximarse a la regla de los cinco nueves en la disponibilidad del servicio eléctrico, por lo menos a nivel de troncal. Para la implementación del presente estudio inicialmente se requiere de dos aspectos, el primero el equipo Reconector y el segundo la instalación de dicho equipo en las redes aéreas, los costos referenciales de cada uno de ellos se los puede revisar en la sección Anexos, donde se detalla los costos en el mercado del reconector a adquirir y los materiales, equipamiento y mano de obra a ser utilizados durante la instalación. A esto también, aunque no se incluye referencia alguna, se le debe sumar los costos de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo, para que cumpla el tiempo de vida útil para el cual fue diseñado el equipo.

En vista que el estudio propuesto está basado en los criterios de confiabilidad, se enfocaron los esfuerzos en el mejoramiento de los índices SAIDI y SAIFI, por ello no se incluye en el presente trabajo un análisis económico de los beneficios que representaría el aumento de la facturación de la energía no suministrada, tarea que puede ser continuada en investigaciones posteriores.

Los efectos e impactos que se obtendrán con el aporte del presente trabajo investigativo, en aspectos relacionados a lo Social, el usuario final al evidenciar una mejoría en la continuidad de servicio, sentirá plena satisfacción por contar con un servicio más garantizado, evitando así interrumpir sus labores productivas. Respeto a los aspectos Ambientales, como la metodología parte de una propuesta inicial de localización de reconectores, es por hecho que operativa o técnicamente se van a incluir aquellos segmentos de red con vegetación considerable, si la propuesta es ratificada para efectivizar su instalación, se evitará que una falla transitoria se convierta en una falla permanente. Mientras que dentro los aspectos Económicos, aunque no se consideró un análisis laborioso, sin embargo es evidente que al mejorar la confiabilidad del AVM, automáticamente esto produce, una reducción de la energía no suministrada, instalación del RA al menor costo posible, aplicación de regímenes sancionatorios por el no cumplimiento de los límites establecidos para el suministro del servicio eléctrico.

3.3 Conclusiones.

- Los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología seleccionada y utilización de los software para el desarrollo de los algoritmos, son los que se esperaban obtener desde el inicio de la investigación, pues como resultado se obtienen los puntos óptimos donde deben ser instalados los RA, y como ya se mostró ello conlleva a una mejora en los índices de confiabilidad del AMV, éstos índices como se pudo evidenciar se reducen en aproximadamente en un 80% tanto para el índice SAIDI como el índice SAIFI, lo cual es muy representativo considerando como se valoran éstos índices, pues se estaría evitando una gran número de interrupciones de servicio con tiempos prolongados.
- El conjunto de posibles soluciones obtenidas de la metodología de algoritmos genéticos, casi en su totalidad son valederas, pues se evidenció que a medida que la evolución avanza, la tendencia de los índices de confiabilidad es a la baja, que es justamente o que se planteó desde un inicio, ya es decisión del diseñador saber seleccionar con cuál de las soluciones óptimas se queda finalmente, al contar con una mejor y mayor cantidad de soluciones a comparación del software propietarios.

- Los parámetros recomendados de entrada para el desarrollo del Algoritmo Genético, son suficientes pues a partir de la quinta o sexta generación los valores de la función objetivo empiezan a estabilizarse, cuando en un inicio la función objetivo presentaba un valor de 0.7392, al irse mejorando la población la función objetivo alcanza su valor máximo de 0.8667, de ahí en más los resultados empiezan a ser repetitivos, por lo que no es necesario subir el número de generaciones o población, específicamente para el circuito de prueba utilizado; en otros sistemas más complejos si puede resultar útil ampliar el espacio de exploración.

CONCLUSIONES GENERALES

- Obtención de los puntos más óptimos dentro de la red de distribución, donde se recomienda deben ser instalados los reconectores automáticos, consiguiendo con ello una reducción de los índices de confiabilidad del sistema, bordeando el 80% de mejora.
- En función de número de clientes, tasa de falla, tiempo de reparación y porcentaje de que una falla transitoria se convierta en permanente se realizó la adquisición automática de los índices de confiabilidad del circuito de prueba IEEE 12 barras, así como un modelamiento y simulación exitosos gracias a las características que ofrece el software OpenDSS dentro de un tiempo eficiente.
- Aplicación de la mejor metodología recomendada por la literatura investigada, para la elaboración del algoritmo de optimización en la plataforma Matlab, como lo son los llamados Algoritmos Genéticos, basados en una población, orientados a una función objetivo y aplicando funciones de variación.
- Aplicación de los algoritmos modelamiento – simulación en OpenDSS y los algoritmos interface – optimización en Matlab en el circuito de prueba IEEE 12 barras, permitiendo la posibilidad de modificar variables y analizar las consecuencias de éstas en los resultados obtenidos.
- Validar que los algoritmos elaborados cumplan con la función para la cual fueron desarrollados, obteniendo resultados confiables y aplicables como solución al problema.
- Visión de los beneficios, una vez que la propuesta sea implementada, a nivel de usuario final éste contará con un servicio continuo, confiable y de calidad; mientras que a nivel de Empresa Distribuidora la facturación será mayor por la reducción de la energía no suministrada a causa de las interrupciones, y adicionalmente dejará de salir de sus arcas las multas por incumplimiento de los indicadores de confiabilidad.

RECOMENDACIONES

- El resultado obtenido durante el desarrollo de la investigación, permite que a futuro estos algoritmos sean aplicados a Alimentadores de Medio Voltaje de una Empresa de Distribución, aportando así al mejoramiento de la confiabilidad en un sistema eléctrico.
- La función objetivo no se trata de una expresión cerrada, más bien está abierta a la adición o modificación de uno o más parámetros que el diseñador requiera introducir de acuerdo a las necesidades de cada Empresa Distribuidora, así se podría incluir por ejemplo la variable número de clientes, que al fin y al cabo son el reflejo de si las cosas se están haciendo bien o mal ante la sociedad en conjunto.
- La puerta queda abierta para que nuevos investigadores continúen con el desarrollo de trabajos enfocados al tema, entre ellos se tiene un análisis pre y post instalación de los reconectores automáticos en las redes, para cuantificar exactamente el beneficio económico que representaría para las Empresas de Distribución el hecho de una mejora en la facturación de la energía no suministrada.
- Al país está ingresando las llamadas Redes Inteligentes, lo que significa la introducción de novedosos componentes al sistema de distribución, por lo que la presente investigación puede ser la base para localización óptima de los nuevos equipos, continuando con la finalidad de ir mejorando la confiabilidad del sistema día a día.
- El hecho que ya se cuente con los reconectores automáticos y su localización óptima, no significa que una vez que se instalaron ya no necesitan de atención o más bien dicho mantenimiento, por las mismas condiciones extremas del medio ambiente es necesario una revisión, limpieza y pruebas periódicas del equipo, considerando que su valor económico es representativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Giovanni Manassero Junior, "Protección y automatización de sistemas de energía eléctrica I. La evolución de los sistemas de energía eléctrica," Escuela Politécnica de USP, São Paulo, Departamento de Ingeniería en Energía Eléctrica y Automatización Ago. 2019.
- [2] William H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Segunda ed., Taylor & Francis Group, Ed. Las Cruces, New México: CRC Press, 2002.
- [3] IEEE, "Todo está en los Planes," *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 20-29, Mar/Abr 2015.
- [4] Ricardo Alberto Hincapié Isaz, Ramón Alfonso Gallego Rendón Horus Emmanuel Salazar García, "Metodología para el planeamiento de sistemas de distribución considerando incertidumbre en la demanda , Vol. 19, Universidad Tecnológica de Pereira," ISSN 0122-1701 , Pereira, Colombia , Scientia et Technica Año XIX ISSN 0122-1701 , Mar. 2014.
- [5] David Cardona Vásquez, "Modelo para Asistir en la Planeación de Corto y Mediano Plazo del Sistema Eléctrico Colombiano," Facultad de Minas, Escuela de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, Tesis Magister Ingeniería de Sistemas 2011.
- [6] Agnelo M. Cassula, Leonidas C. Resende, Ronaldo M. Almeida, Mario T. Yamasaki, Gustavo M. F. Paula Armando M. Leite da Silva, "Reliability evaluation of distribution systems considering automatic reclosers," International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Ames, IA, USA, 2004.
- [7] Wanir J. Madeiros Junior y José W. L. Nerys, "Recloser modernization using digital signal processors," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, France, doi: 10.1109/ISIE.2004.1572038, 2004.
- [8] S. Jamali and H. Shateri, "Optimal Siting of Recloser and Sectionalizers to Reduce Non-Distributed Energy," IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, China, doi: 10.1109/TDC.2005.1547113, 2005.
- [9] Lingfeng Wang y Chanan Singh, "Reliability-Constrained Optimum Recloser Placement in Distributed Generation Using Ant Colony System Algorithm," IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, doi: 10.1109/PSCE.2006.29, 2006.
- [10] A. M. Mohamad, I. Z. Abidin, M. Z. Baharuddin and E. C. Yeoh A. H. Hashim, "Determination of Auto-Recloser Location Using Cost Analysis in the Sabah Electricity Distribution Network ," in *IEEE International Power and Energy Conference*, Putra Jaya, Malaysia, 2006, pp. 587-590.
- [11] Naigang Cui, Rongjun Mu Jichao Tian, "Optimal Formation Reconfiguration Using Genetic Algorithms," International Conference on Computer Modeling and Simulation, Macau, China, doi: 10.1109/ICCMS.2009.54., 2009.
- [12] Hasan Monsef y Saeed Zolfaghari Moghadam Masoud Jafari, "Optimum number, placement and capacity of DGs and reclosers using analysis

- hierarchical process and genetic," 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874832, 2011.
- [13] Alejandro Núñez Jiménez y José Ortiz de Lanzagorta Jaime Legerén Álvarez, "Introducción a los Algoritmos genéticos," Informe de seminario Modelización y Análisis Numéricos DMAMI, Madrid, Seminario 2012.
- [14] Carlos Eduardo Homem de Mello y Carlos Alexandre de Sousa Penin Daniel Perez Duarte, "Intelligent system to management of reclosers and proposition of maneuvers in distribution network," IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), Sao Paulo, Brazil, doi: 10.1109/ISGT-LA.2013.6554407, 2013.
- [15] A. Grajales, R. A. Hincapié, M. Granada and R. A. Gallego O. D. Montoya, "Methodology for optimal distribution system planning considering automatic reclosers to improve reliability indices," IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), Medellin, Colombia, doi: 10.1109/TDC-LA.2014.6955232, 2014.
- [16] O. D. Montoya, R. A. Hincapié and M. Granada A. Álzate, "Optimal location of reclosers in distribution systems considering reliability in communication channels," Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits & Systems doi:10.1109/LASCAS.2015.7250487, 2015.
- [17] Jerome V. Josken y Dennis A. Walder Michael Costa, "Fault Hunting Using Three-Phase Reclosers," IEEE Rural Electric Power Conference, Asheville, NC, USA, doi: 10.1109/REPC.2015.19, 2015.
- [18] Nicanor Quijano, and Ángela I. Cadena Miguel A. Velásquez, "Multi-objective planning of recloser-based protection systems on DG enhanced feeders," IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), Montevideo, Uruguay, doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381262, 2015.
- [19] Qiu Qin and N. Eva Wu, "Recloser allocation and placement for rural distribution systems," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, , doi: 10.1109/PESGM.2015.7286412., 2015.
- [20] Oscar Danilo Montoya Giraldo, Ricardo Alberto Hincapié Isaza y Mauricio Granada Echeverria Juan Pablo Gallego Londoño, "Ubicación óptima de reconectores y fusibles en sistemas de distribución," ITECKNE, Pereira, Colombia, doi: ISSN 1692-1798, ISSN Digital 2339 - 3483, 2016.
- [21] Mario Aldemar Ríos Giraldo, "Localización Óptima de Reconectores Normalmente Abiertos para Transferencia de Carga," Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, Magister en Ingeniería Eléctrica 2016.
- [22] Ewald Erasmus y Raj Naidoo, "Smart distribution and optimisation of the number and position of reclosers to minimise equipment damage," IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Torino, doi:10.1109/ISGTEurope.2017.8260133, 2017.

- [23] J. Senthil kumar, S. Charles Raja y P. Venkatesh G. Siva Priya, "Distributed generator and reclosers placement in distribution system with reliability consideration," *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, India, doi: 10.1109/IPACT.2017.8244910, 2017.
- [24] Anton I. Karpov and Dmitry A. Akimov, "Integral indicators improvement (SAIFI) of power supply reliability in electric distribution systems based on reclosers placement optimization," *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Moscow and St. Petersburg, Russia, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317182, 2018.
- [25] O. D. Montoya, A. Grajales, R. A. Hincapie and M. Granada L. F. Grisales, "Optimal Planning and Operation of Distribution Systems Considering Distributed Energy Resources and Automatic Reclosers," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 126-134, Ene. 2018.
- [26] Aouzar Estebsari and Alireza Bahmanyar Arash Zeinalzadeh, "Multi-Objective Optimal Placement of Recloser and Sectionalizer in Electricity Distribution Feeders," *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Genoa, Italy, doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783430, 2019.
- [27] Shahid Junaid Ansari, Afroz Alam, Salman Khan, Mustufa Sarwar y Mohammad Zaid Hira Sultan, "Reliability Improvement of a Radial Distribution System with Recloser Placement," *International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, New Delhi, India, 978-93-5351-098, 2019.
- [28] Hernán Santana, "R-GOOSE in a recloser - What could it mean?," *FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE)*, Medellin, Colombia, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984985., 2019.
- [29] Siomara Lastenia Redrobán Amores, "Reconfiguración óptima multiobjetivo de alimentadores primarios como una estrategia de planificación para el mejoramiento del desempeño operativo de los sistemas eléctricos de distribución," *Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Tesis Magister en Ingeniería Eléctrica en Distribución* 2019.
- [30] Germán Israel Casillas Peña, "Asignación de equipos de control de voltaje en redes de distribución considerando recursos energéticos distribuidos," *Escuela Politécnica, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil, Tesis Magister en Ciencias con mención en Sistemas de Potencia* 2017.
- [31] Cristián Guevara V., "Cálculo y Selección de Protecciones en Media y Baja Tensión," *Productores Editores Integral Comunicaciones Ltda, Chile, 1998.*
- [32] Grupo de Empresas SAESA, "Manual de Equipos MT/BT," *Subgerencia de Proyectos y Normas, Chile, 2011/01, 2011.*
- [33] Gonzalo Carballo y Gustavo Muinelo Martín Burgardt, "Optimización de la Red de Distribución en Baja y Media Tensión," *Universidad de la*

República, Facultad de Ingeniería – Instituto de Ingeniería Eléctrica, Montevideo, Proyecto de Fin de Carrera 2005.

- [34] María Macías Infantes, "Estudio comparativo de técnicas de optimización para la actualización de modelos de elementos finitos," Universidad de Sevilla – Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, Trabajo de fin de Master 2016.
- [35] Francisco Herrera, "Introducción a los Algoritmos Metaheurísticos," Departamento de Ciencias de la Computación e I. A., Universidad de Granada, España, Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial Dic. 2010.
- [36] Luis Iván Negrín Hernández y Emilio Carlos Nelly Silva, "Optimización en Ingeniería," Universidad Central Marta Abreu de las Villas – Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo, Cuba – Sao Paulo, Proyecto Fin de Carrera 2018.
- [37] José Ignacio Hidalgo Pérez y Carlos Cervigón Rückauer, "Una Revisión de los Algoritmos Evolutivos y sus Aplicaciones," Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática - Universidad Complutense de Madrid & Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas CES Felipe II, Madrid, 2015.
- [38] Alfonso Mateos Andaluz, "Algoritmos Evolutivos y Algoritmos Genéticos," Ingeniería de Telecomunicación – Universidad Carlos III de Madrid, Madrid - España, 2016.
- [39] D. Manuel Cruz Pérez, "Optimización de costes y emisiones en sistemas eléctricos de potencia," Universidad de Las Palmas de Gran Canaria – Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en la Ingeniería, España, Proyecto de Doctorado en Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería 2015.
- [40] Gustavo Adolfo Gómez Ramírez, "Evolución y tendencias de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia," *Tecnología en Marcha - Costa Rica*, vol. 29, no. 2, pp. 3-13, Abril-Junio 2016.
- [41] Jhon Alexander Porras Torres, Mauricio Granada Echeverri, Ricardo A. Hincapié Isaza Carlos Andrés Pulgarín Flórez, "Diseño y Análisis de la automatización de la distribución en el Sistema de Distribución Local-SDL de la Empresa de Energía del Quindío-EDEQ SA ESP," Congreso Internacional en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, La Habana, Cuba , 2013.
- [42] María Gabriela Mago, Luis Vallés Defendine, Jhon Jairo Olaya Florez, and Diego Subero, "Determinación de la confiabilidad o tiempo promedio entre fallas en transformadores de distribución," *Revista Ingeniería UC, Universidad de Carabobo*, vol. 21, no. 3, pp. 33-37, Septiembre-Diciembre 2014.
- [43] Chusin L., Escobar B. Salazar G., "Análisis de Confiabilidad de Sistemas de Distribución Eléctrica con Penetración de Generación Distribuida," *Revista Politécnica* , vol. 36, no. 1, pp. 1-10, Septiembre 2015.
- [44] José Leal Parra, "Manual de uso del programa OpenDSS para el curso de distribución y transmisión de potencia," Escuela de Ingeniería Eléctrica,

Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2016.

- [45] María Jesús del Valle Palacios, "Estudio y configuración de almacenamiento eléctrico en una red de distribución con generación renovable," Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Fin de Grado Ingeniería en Tecnologías Industriales 2019.
- [46] ARCERNNR, "Regulación No. ARCERNNR – 002/20, Calidad del Servicio de Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica," ARCERNNR, Quito, Regulación 002/2, Nov. 2020.
- [47] Marco Aedo López y Eveling Castro Gutiérrez, *Fundamentos de Programación 2, Tópicos de Programación Orientada a Objetos*, Primera ed., Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Ed. Arequipa, Perú: UNSA, 2021.

ANEXOS

Lista de Acrónimos.

ABB	Asea Brown Boveri, Corporación Multinacional Suizo-Sueca.
AG	Algoritmo Genético.
AIEE	Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos.
AMV	Alimentador de Medio Voltaje.
AOM	Administración, Operación y Mantenimiento.
ARCERNNR	Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables.
DP	Dispositivo de Protección.
EA	Equipo de Almacenamiento de Energía.
ENS	Energía no Suministrada.
EPRI	Instituto de Investigación de Energía Eléctrica
FMIK	Frecuencia media de interrupción por kVA nominal instalado.
FO	Función Objetivo.
GD	Generación Distribuida.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
MV	Medio Voltaje.
NSGA	Algoritmos Genéticos de Clasificación no Dominados.
OpenDSS	Sistema de Simulación de Distribución Abierta.
POO	Programación Orientada a Objetos.
RA	Reconectador Automático.
RNA	Reconectador Normalmente Abierto.

RNC	Reconectador Normalmente Cerrado.
SAIDI	Índice de Duración Media de Interrupción del Sistema.
SAIFI	Índice de Frecuencia Media de Interrupción del Sistema.
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
SED	Sistema Eléctrico de Distribución.
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
SF6	Hexafluoruro de Azufre.
S/E	Subestación.
TTIK	Tiempo total de interrupción por kVA nominal instalado.

Parámetros de configuración circuito de prueba IEEE 12 barras.

Para una mejor comprensión de la metodología propuesta, a continuación se expone una descripción de los datos básicos y necesarios para el modelado dentro de OpenDSS del sistema de prueba IEEE 12 barras (ver Figura 40):

- Modelo de carga: una carga se puede conectar a un nodo o colocarse uniformemente a lo largo de un sección de línea, pueden tratarse de cargas trifásicas (balanceadas o no) conectadas en estrella o triángulo y cargas monofásicas conectadas línea-tierra o línea-línea. Las cargas pueden modelarse como kW o kVar constantes (PQ), impedancia constante (Z) o corriente constante (I). La Tabla 14 muestra la codificación que se usa para identificar los diferentes tipos de carga.

Tabla 14: Códigos modelo de carga

Código	Conexión	Modelo
Y-PQ	Estrella	Potencia constante
Y-Z	Estrella	Impedancia constante
Y-I	Estrella	Corriente constante
D-PQ	Delta	Potencia constante
D-Z	Delta	Impedancia constante
D-I	Delta	Corriente constante

Elaborado por Autoría.

- Condensadores de derivación: se conecta de forma similar a una carga y se modelan como una susceptancia constante y se los identifica como kVar nominales.
- Datos de conductor: las características de varios conductores utilizados en configuraciones aéreas de los alimentadores de prueba, se muestran en la Tabla 15. Donde cada columna corresponde a: (1) Tamaño del conductor en AWG o kcmil (2) Tipo de conductor, AA = completamente aluminio, ACSR = aluminio con refuerzo de acero y CU = cobre (3) 60Hz resistencia a 50°C, ohms/millas (4) Diámetro externo del conductor en pulgadas (5) Radio medio geométrico en pies (6) Capacidad a 50°C en amperios.

Tabla 15: Especificaciones de conductor

1	2	3	4	5	6
1000	AA	0.105	1.15	0.0368	698
556.5	ACSR	0.1859	0.927	0.0313	730

500	AA	0.206	0.813	0.026	483
336.4	ACSR	0.306	0.721	0.0244	530
250	AA	0.41	0.567	0.0171	329
# 4/0	ACSR	0.592	0.563	0.00814	340
# 2/0	AA	0.769	0.414	0.0125	230
# 1/0	ACSR	1.12	0.398	0.00446	230
# 1/0	AA	0.97	0.368	0.0111	310
# 2	AA	1.54	0.292	0.0883	156
# 2	ACSR	1.69	0.316	0.00418	180
# 4	ACSR	2.55	0.257	0.00452	140
# 10	CU	5.903	0.102	0.00331	80
# 12	CU	9.375	0.081	0.00262	75
# 14	CU	14.872	0.064	0.00208	20

Elaborado por Autoría.

- Código de configuración: cada alimentador de prueba viene acompañado con su respectiva tabla de códigos de configuración.
- Datos de segmento de línea: consiste en las terminaciones de los nodos de cada segmento de línea, longitud del segmento y un código de configuración.
- Regulador de voltaje: son dispositivos de tipo escalonado, que pueden conectarse en la subestación o en un segmento de línea específico.

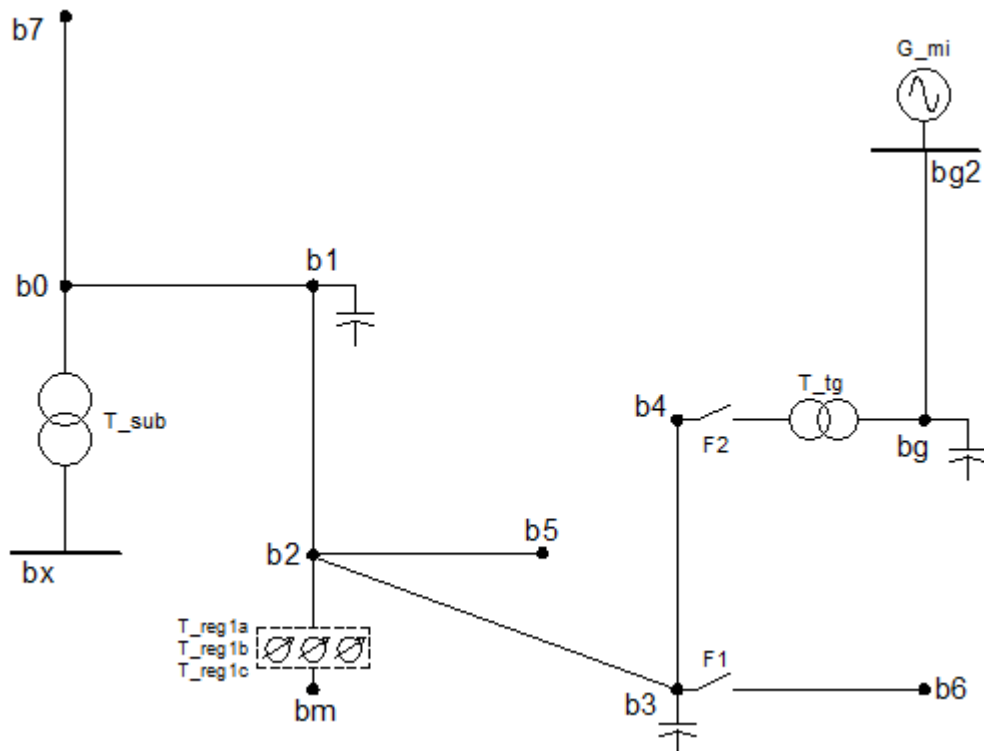


Figura 40: Diagrama alimentador de prueba IEEE 12 barras.

Elaborado por Autoría.

En este punto se describe las características principales del circuito de prueba IEEE de 12 barras, en la Tabla 16 se observa los parámetros eléctricos de la fuente principal de energía.

Tabla 16: Fuente principal de voltaje.

Parámetro	Valor
Nombre:	bx
kV:	115
pu:	1.0475
Angulo:	0
Frecuencia:	60
Fases:	3
MVA3:	20000
MVA1:	21000
X1R1:	4
X0R0:	3

Elaborado por Autoría.

La Tabla 17 señala las líneas de distribución formadas en el circuito de prueba.

Tabla 17: Líneas distribución circuito IEEE 12 barras.

Nombre	Origen conexión	Fin conexión	Longitud [kft]
line.11	b0	b1	10
line.12	b1	b2	10
line.13	b2	b3	10
line.14	b3	b4	10
line.15	b2	b5	10
line.16	b3	b6	10
line.17	b0	b7	10
Line.MotorLeads	bg	bg2	0.01

Elaborado por Autoría.

En lo que se refiere a las especificaciones técnicas de las cargas conectadas en el circuito, el detalle se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18: Cargas conectadas a las diferentes barras.

Nombre	Punto conexión	Conexión	Fases	Potencia [kW]	cos ϕ	Modelo carga	Voltaje [kV]	
							Prim.	Sec.
Load.ldb0	b0	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb1	b1	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb2	b2	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb3	b3	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb4	b4	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb5	b5	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb6	b6	Y	3	0.1	1	2	12.47	
Load.ldb7	b7	Y	3	0.1	1	2	12.47	

Elaborado por Autoría.

Los datos de los transformadores instalados dentro del circuito de prueba, se muestran a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19: Transformadores instalados en el circuito de prueba.

Nombre	Fases	Devanados	Bus inicio	Bus fin	Conexión	Voltaje [kV]		Potencia [kVA]	
						Prim.	Sec.	Prim.	Sec.
Transformer.sub	3	2	bx	b0	Δ -Y	115	12.47	20000	20000

Transformer.tg	3	2	b4	bg	Y-Y	12.47	0.48	1500	1500
Transformer.reg1a	1	2	b2.1	bm.1	Y-Y	12.47	12.47	2000	2000
Transformer.reg1b	1	2	b2.2	bm.2	Y-Y	12.47	12.47	2000	2000
Transformer.reg1c	1	2	b2.3	bm.3	Y-Y	12.47	12.47	2000	2000

Elaborado por Autoría.

Además de los elementos indicados en el SED, el circuito tiene incluido banco de capacitores, mismos que se detallan en la Tabla 20.

Tabla 20: Capacitores instalados dentro del circuito de prueba.

Nombre	Punto conexión	Conexión	Fases	Potencia [kVar]	Voltaje [kV]
Capacitor.c1	b1	Y	3	600	12.47
Capacitor.c2	b3	Y	3	600	12.47
Capacitor.cg	bg	Y	3	600	0.48

Elaborado por Autoría.

Finalmente también se incluye generación distribuida, gracias al aporte de un motor de inducción en uno de los extremos del circuito, tal cual como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21: Generación distribuida en el circuito de prueba.

Nombre	Punto conexión	Potencia		Conexión	Voltaje [kV]
		[kW]	[kVA]		
IndMach012.Motor1	bg2	1200	1500	Δ	0.48

Elaborado por Autoría.

Dentro de OpenDSS se incluye dos script que incluye todos los objetos / clases / instrucciones, que son necesarios para definir el circuito a simular. El archivo llamado “Master.DSS” contiene todas las definiciones de los parámetros eléctricos como: fuente, líneas, transformadores, cargas, capacitores, reguladores de tensión, etc., como se indica en la Figura 41. Todo esto se desarrolla empleando la Programación Orientada a Objetos (POO) [47].

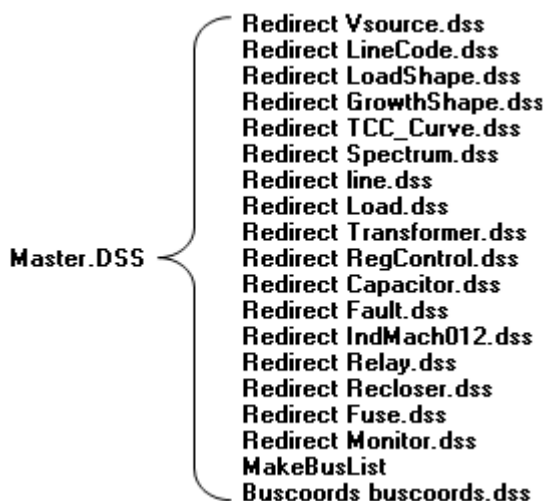


Figura 41: Archivo raíz que contiene los objetos del circuito eléctrico.

Elaborado por Autoría.

Para iniciar con el diseño de la solución al problema, se tiene que modelar el circuito de distribución IEEE 12 barras en OpenDSS, para ello se define cada uno de los objetos con sus respectivas características o atributos, mostrados en las clases de la Figura 41, a continuación se muestra las propiedades generales que debe contener cada objeto.

- Fuente de Alimentación del SED (Figura 42):

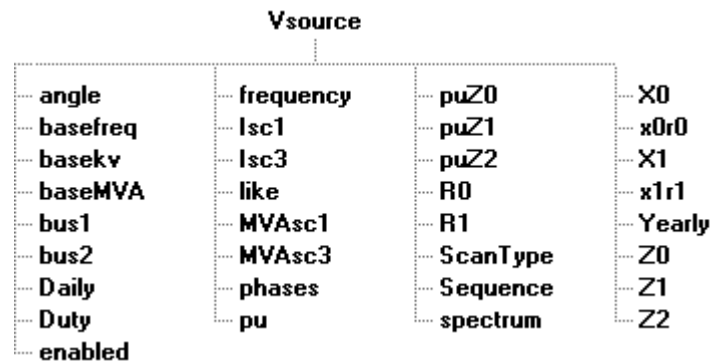


Figura 42: Configuración objeto Vsource
Elaborado por Autoría.

- Líneas de Distribución del SED (Figura 43):

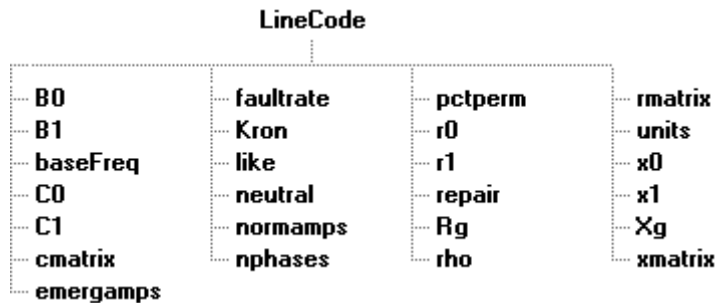


Figura 43: Configuración objeto LineCode
Elaborado por Autoría.

- Modelos de Cargas del SED (Figura 44):

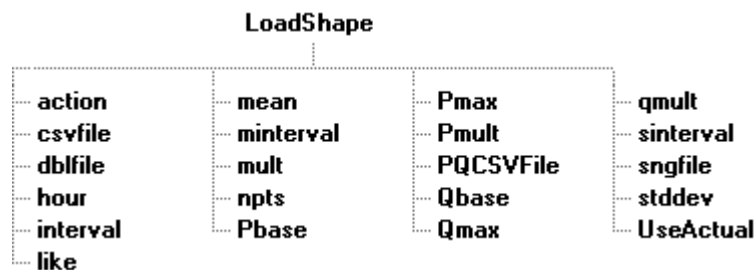


Figura 44: Configuración objeto LoadShape
Elaborado por Autoría.

- Modelos de Crecimiento del SED (Figura 45):

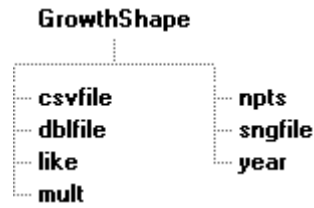


Figura 45: Configuración objeto GrowthShape
Elaborado por Autoría.

- Curvas de Transformadores de Corrientes (Figura 46):

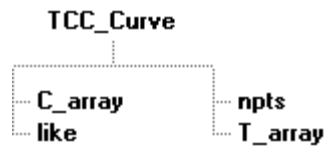


Figura 46: Configuración objeto TCC_Curve
Elaborado por Autoría.

- Espectro de Carga (Figura 47):

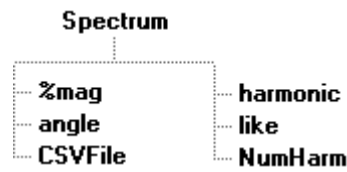


Figura 47: Configuración objeto Spectrum
Elaborado por Autoría.

- Especificaciones de Líneas de SED (Figura 48):

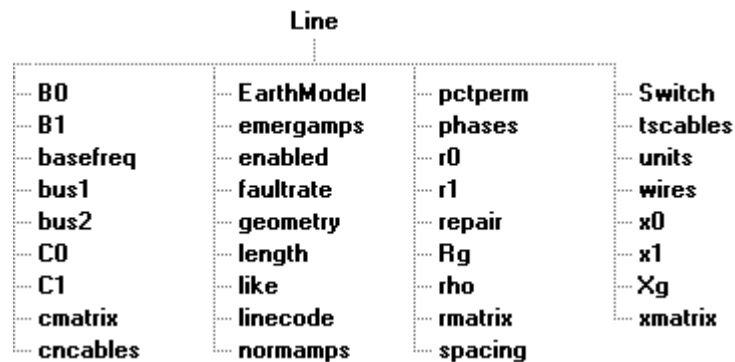


Figura 48: Configuración objeto Line
Elaborado por Autoría.

- Características de las Cargas (Figura 49):

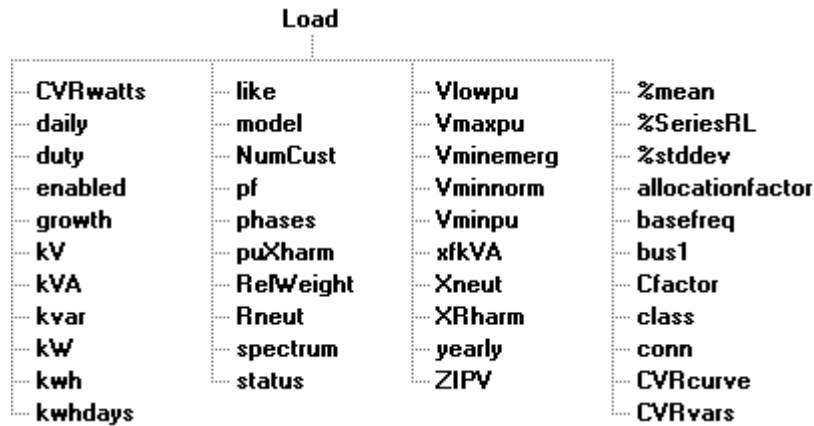


Figura 49: Configuración objeto Load
Elaborado por Autoría.

- Transformadores del SED (Figura 50):

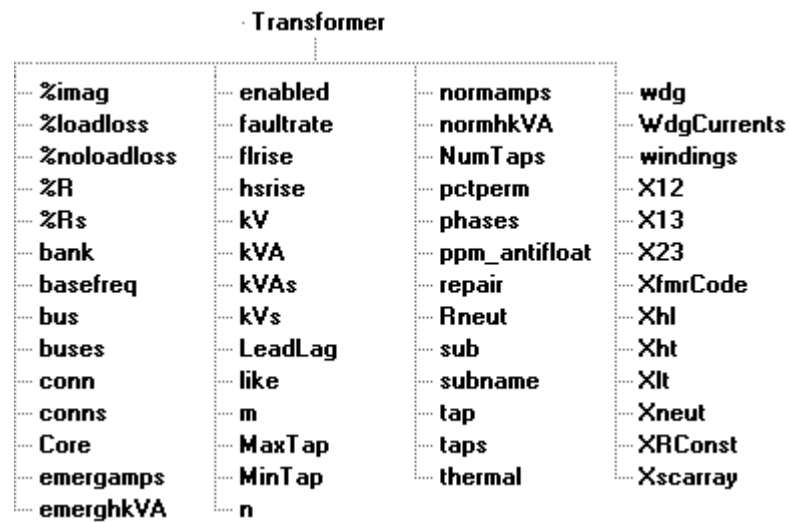


Figura 50: Configuración objeto Transformer
Elaborado por Autoría.

- Control de los Reguladores del SED (Figura 51):

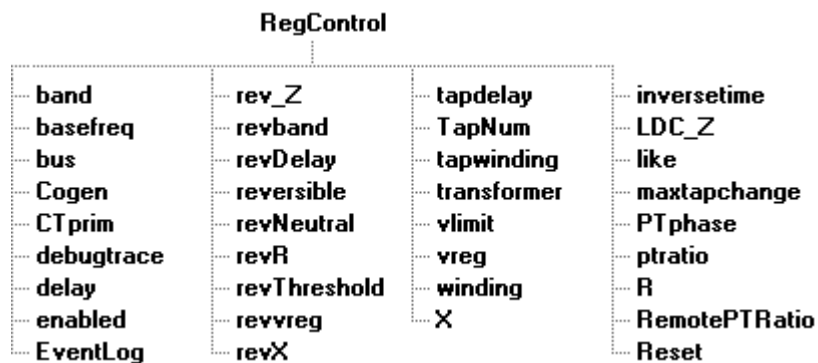


Figura 51: Configuración objeto RegControl
Elaborado por Autoría.

- Capacitores del SED (Figura 52):

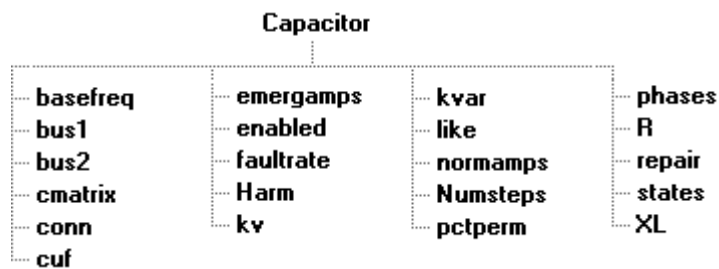


Figura 52: Configuración objeto Capacitor

Elaborado por Autoría.

- Configuración Fallas (Figura 53):

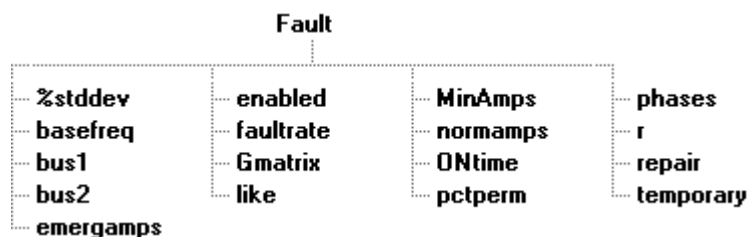


Figura 53: Configuración objeto Fault

Elaborado por Autoría.

- Generación Distribuida (Figura 54):

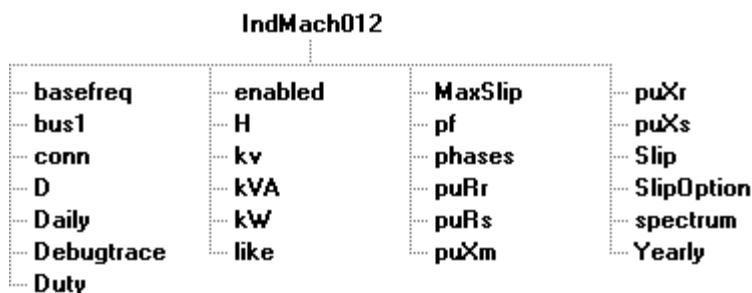


Figura 54: Configuración objeto IndMach012

Elaborado por Autoría.

- Relés de Protección (Figura 55):

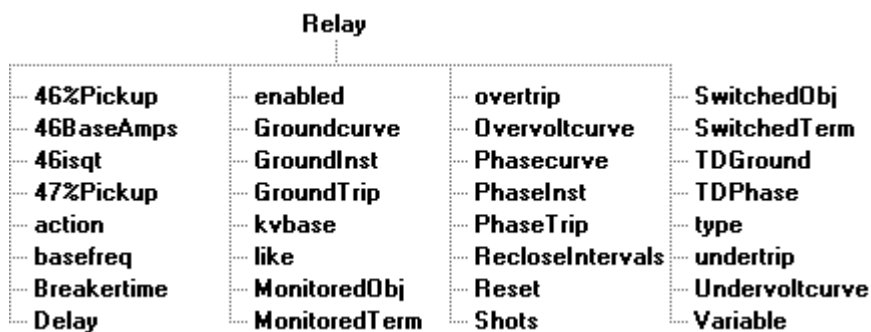


Figura 55: Configuración objeto Relay

Elaborado por Autoría.

- Reconectador Automático (Figura 56):

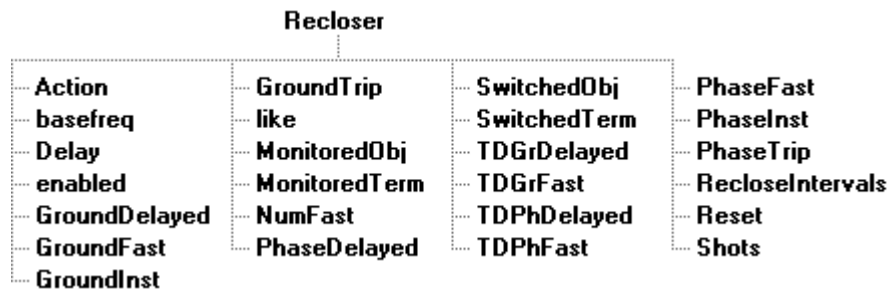


Figura 56: Configuración objeto Recloser

Elaborado por Autoría.

- Fusibles de Protección (Figura 57):

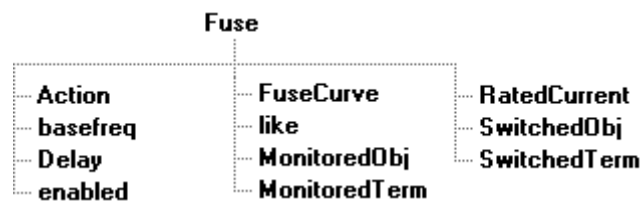


Figura 57: Configuración objeto Fuse

Elaborado por Autoría.

- Medidor de Energía (Figura 58):

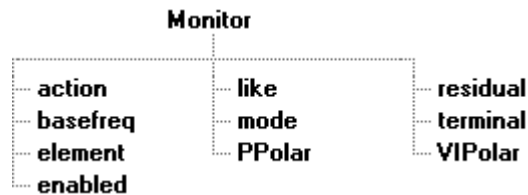


Figura 58: Configuración objeto Monitor

Elaborado por Autoría.

Cabe indicar que no es necesario introducir todos los parámetros en cada objeto, pues muchas veces por más levantamiento de la información que se realice, no es posible conocer a exactitud los datos técnicos del fabricante. Mientras más información sea ingresada al OpenDSS, el modelamiento será más aproximado a la realidad y el análisis de su comportamiento arrojará resultados más exactos, los mismos que serán usados para el estudio propuesto.

Una vez que se tiene modelado el SED, mediante la ejecución del comando “*MakeBusList*” se procede a actualizar la lista de las barras o buses, utilizando los elementos del circuito habilitado actualmente (ver Figura 59).

```

▲ Executive
└─ MakeBusList

```

Figura 59: Comando MakeBusList.
Elaborado por Autoría.

Para la representación gráfica de las barras o buses se define las *coordenadas* x , y para cada una de las barras; comando que siempre se ejecuta después de la instrucción Solve o MakeBusList. Por medio de un objeto DSS, se lleva a cabo el ingreso de las coordenadas en cada barra, como se muestra en la Figura 60.

```

▲ Executive
└─ Buscoords {
Barra 01 → bx
Barra 02 → b0
Barra 03 → b1
Barra 04 → b2
Barra 05 → bm
Barra 06 → b3
Barra 07 → b4
Barra 08 → b5
Barra 09 → b6
Barra 10 → b7
Barra 11 → bg
Barra 12 → bg2
}

```

Figura 60: Comando Buscoords.
Elaborado por Autoría.

El siguiente paso es mediante el comando *Set*, que se utiliza para establecer varios modos y opciones de solución DSS, definir los voltajes bases de las barras con los que se va a trabajar en el SED, en voltajes fase – fase, ver Figura 61.

```

▲ Executive
└─ Set

```

Figura 61: Comando Set.
Elaborado por Autoría.

Finalmente el script “Master.DSS” con todos los parámetros del SED ya establecidos, se calcula los voltajes bases de las barras a partir de los voltajes definidos con el comando “*Set voltagebases*”, para lo cual se emplea el comando “*CalcVoltageBases*” o simplemente “*calcv*”.

Pues bien ahora se procede a elaborar el segundo script, llamado “RunGC1.dss” que para una mejor comprensión de la solución, se ha considerado separar por una parte la resolución del flujo de potencia del SED y por otra parte la representación gráfica del circuito de prueba, donde se analizara todos aquellos variables que resulten útiles para ser exportadas al software Matlab y posteriormente ser utilizados en el desarrollo del AG, que finalmente nos proporcionará la solución

tan esperada a la problemática inicial. Se utiliza como base para script “RunGC1.dss” el que se encuentra disponible en el software OpenDSS llamado “IndMach012 Test Example Run File” y haciendo uso de uno de los beneficios de la POO, como lo es la re-usabilidad de códigos, se procede a realizar los ajustes necesarios de acuerdo a las necesidades propias que presenta el problema de investigación planteado.

En primera instancia lo que procede es, llamar y compilar el script que contiene SED a ser analizado, para lo cual se emplea el comando mostrado en la Figura 62. El comando se encarga de leer el nombre del archivo designado que contiene los comandos DSS y los procesa como si fueran introducidos directamente en la línea de comandos.

▲ **Executive**
 └─ **Compile**

Figura 62: Comando Compile.

Elaborado por Autoría.

Se coloca un medidor en función del tiempo, como un nuevo objeto dentro del DSS, para el objeto Vsource, ver Figura 63; dentro de la configuración se cuenta con varios modos que de acuerdo al bit, se designa los valores que el monitor debe capturar.

▲ **Monitor**
 └─ **mode**

- 0 = Voltages and currents
- 1 = Powers
- 2 = Tap Position (Transformer Device only)
- 3 = State Variables (PCElements only)
- 4 = Flicker level and severity index (Pst) for voltages. No adders apply.
 Flicker level at simulation time step, Pst at 10-minute time step.
- 5 = Solution variables (Iterations, etc).
 Normally, these would be actual phasor quantities from solution.
- 6 = Capacitor Switching (Capacitors only)
- 7 = Storage state vars (Storage device only)
- 8 = Winding voltages and all winding currents (Transformer device only)
- 9 = Losses, watts and var (of monitored device)

Figura 63: Configuración objeto Monitor.

Elaborado por Autoría.

Con la ayuda del comando “Set” se establece los modos u opciones de solución DSS, en este caso las iteraciones máximas de control, con las instrucciones “Maxcontroliter” o “Maxiterations”. Es hora de simular el SED por medio del comando “Solve” (ver Figura 64), que realiza la solución del modo preestablecido con el comando “Set”.

▲ Executive
 └─ Solve

Figura 64: Comando Solve.
 Elaborado por Autoría.

Se solicita mostrar los resultados del flujo de potencia del SED, de acuerdo a las necesidades y requerimientos que se tengan, existe una gran variedad de opciones para el comando Show, tal cual como se muestra en la Figura 65.

Show

autoadded	eventlog	mismatch	taps
buses	faults	monitor	topology
busflow	generators	overloads	unserved
Controlled	isolated	panel	variables
controlqueue	kybasemismatch	powers	voltages
convergence	lineconstants	QueryLog	y
currents	loops	ratings	yprim
deltaV	losses	Result	zone
elements	meters		

Figura 65: Comando Show.
 Elaborado por Autoría.

Para analizar el comportamiento del SED ante alguna interrupción de servicio eléctrico, para un posterior análisis de la confiabilidad, se introduce una falla al sistema de generación, para lo cual nuevamente se hace uso del comando “Set”, con el cual se parametriza éste nuevo escenario. Se adiciona un nuevo medidor de energía, que permita conocer la variación del flujo de potencia post falla y hacemos uso del comando “Solve”. Los resultados obtenidos se tienen que devolver, a través del comando “Get” (ver Figura 66), para poder emplearlos en el desarrollo del algoritmo genético; estos valores son almacenados en la propiedad de *Results* de la interfaz Text creada.

▲ Executive
 └─ Get

Figura 66: Comando Get.
 Elaborado por Autoría.

Para una mejor comprensión de los resultados, el OpenDSS brinda la posibilidad de realizar trazos o gráficos de todos aquellos parámetros que varían en relación del tiempo, para ello se emplea el comando “Plot” que cuenta con varias opciones, tal como se muestra en la Figura 67.

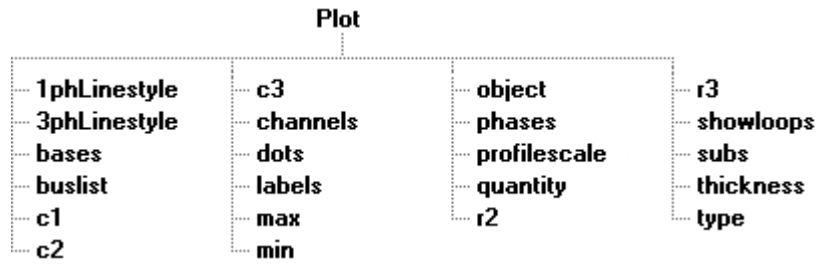


Figura 67: Comando Plot.

Elaborado por Autoría.

Para la investigación es necesario aplicar una de las funcionalidades del OpenDSS, como son los cálculos de confiabilidad: índices de fallas y número de interrupciones, para ello se hace uso del comando “*RelCalc*” mostrado en la Figura 68.



Figura 68: Comando RelCalc.

Elaborado por Autoría.

Para el desarrollo del algoritmo genético se requiere consultar (“ ? ”) los valores de los índices de confiabilidad, los mismos que son almacenados en la ventana de Resultados Globales, cabe indicar que se debe especificar el nombre completo de la variable o propiedad requerida, mediante el uso del comando “*EnergyMeter*” como se indica en la Figura 69.

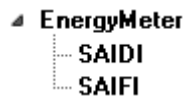


Figura 69: Comando EnergyMeter.

Elaborado por Autoría.

Costo Referencial.

La investigación propuesta permite recomendar los puntos más óptimos, tanto técnica como operativamente donde los RA deberían ser instalados en el AMV, teniendo en cuenta que el estudio se basó en el mejoramiento de la confiabilidad del SED.

La aplicación resultante de la investigación, se la puede replicar en Empresas Distribuidoras, para que sus áreas de Mantenimiento ejecuten la instalación de los RA en los puntos óptimos dentro del AMV, tal como se indica en la Figura 70, para la ejecución de dicha actividad se consideran los costos siguientes:

- Costo del equipo, RA.
- Accesorios y equipamiento para la instalación aérea.
- Mano de obra y movilización.

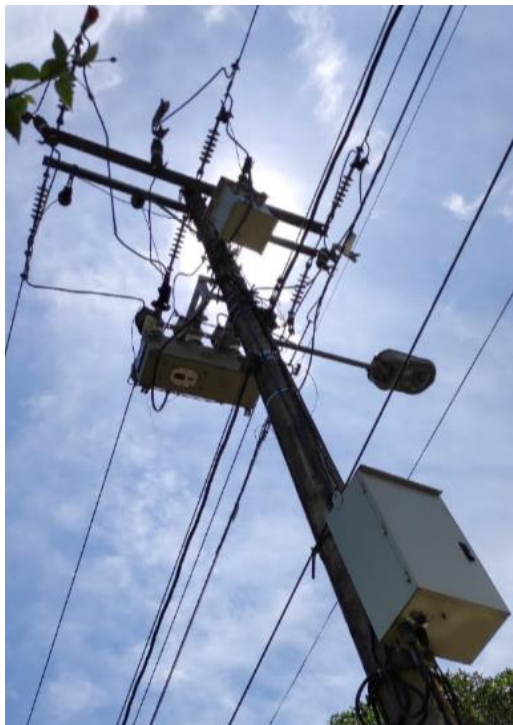


Figura 70: Implementación de la investigación propuesta.
Elaborado por Autoría.

A continuación se pone a consideración los costos referenciales en lo que respecta al equipo Reconectador Automático, mostrado en la Figura 71.

Guayaquil, 28 de Marzo del 2022

PROFORMA No. 0006-V01-BT-2022
FOR L.VPR 01B VER 27 06 11

Ing. Marcos Silva

VENDEDOR
Ing. Bárbara Tamayo Wong
Ingeniería de Cobertura
Teléfono 1700 467763
Celular: 0991760603
Email: btamayo@enerluz.ec

Ciudad

Referencia: RECONECTADOR 13,8KV

ITEM	CANT.	UN	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO USD\$	PRECIO TOTAL USD\$
1	1	U	RECONECTADOR 15KV, 630A, 15KA. VER ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EN ARCHIVOS ANEXOS. NO INCLUYE INSTALACIÓN.	23000,00	23000,00
				SUBTOTAL	23.000,00
				IVA 12%	2760,00
				TOTAL \$	25760,00

Son: VEINTETRES MIL con 00/100 DÓLARES SIN IVA

TERMINOS Y CONDICIONES DE LA OFERTA:

Validez: 45 días.

Forma de Pago: 70% anticipo y saldo contra entrega.

Garantía Técnica: 12 meses.

Tiempo de entrega: 110 días.

Agradecemos su amable solicitud y quedamos a la espera de sus órdenes.

Atentamente,



Ing. Bárbara Tamayo Wong
Ingeniera de Cobertura

Figura 71: Proforma reconector NOVA 15.

Elaborado por PRO Eléctrica.

La Figura 72 muestra el equipamiento / accesorios necesarios para la instalación del Reconector Automático en redes eléctricas aéreas, y la mano de obra siendo su valor referencial el de 2,805.04 USD por cada equipo.



CORPORACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD CNEL EP
UN SUCUMBOS
REPORTE DE FISCALIZACION DE ORDEN DE TRABAJO 556

PRESUPUESTO No: RD202000049 - 556
TIPO: MANT. RED DISTRIBUCION
ROUTE: 22-2-50-1
PROVINCIA: ORELLANA
PARRQUOIA: NUEVO ROCAFUERTE
REF: 0
DIRECCION: SISTEMAS AISLADOS DE NUEVO ROCAFUERTE Y TIPUTINI
CLIENTE: EDISON VALLEJO
FISCALIZADOR: 1723138879-PRADO TOALOMBO JOHNNY RICHARD
DESCRIPCION: TRABAJO DE INSTALACION DE DOS RECONECTADORES EN NUEVO ROCAFUERTE Y TIPUTINI , ORDEN DE TRABAJO ASIGNADO AL SR JOHNNY PRADO Y AL GRUPO DE MANTENIMIENTO DE LAGO AGRO

FEC/DISEÑO: 01-ENE-22
FEC/VALORIZACION: 01-ENE-22
ALIMENTADOR: 20GE030T11-(NUEVO ROCAFU)
CANTON: AGUARICO
SECTOR: NUEVO ROCAFUERTE
DIGITADO POR: 01-ENE-22
DISTANCIA KM:
FEC EJECUCION: 01-FEB-22
FEC FISCALIZACION: 01-FEB-22

DETALLE DE MATERIALES.

ITEM	DESCRIPCION	CANT/SOL	CANT/INST	EGRESOS	DBE	DME	DF	COSTO UN	TOTAL
010201056000	ALAMBRE DE AL. DESNUDO SOLIDO, PARA ATADURA, 6 AWG	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
010602064000	CONECTOR DE ALEACION DE AL, RANURAS PARALELAS, DOS	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
011008074000	CONECTOR DE ALEACION DE CU, RANURAS PARALELAS, DOS	16.00	16.00	16.00	0.00	0.00	0.00	11.19	179.11
011032013000	CONECTOR DE ALEACION DE CU, SISTEMA DE TIERRA, A.U.J	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	15.85	31.69
012601072000	GRAPA DE ALEACION DE AL, TERMINAL APERNADO, TIPO P	12.00	12.00	12.00	0.00	0.00	0.00	11.75	141.01
012611074000	GRAPA DE ALEACION DE AL, PARA DERIVACION DE LINEA	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	10.21	20.42
013811071000	TERMINAL DE CU - SN, DE COMPRESION, PLANO BARRIL	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	10.06	20.12
014216180000	VANILLA DE ACERO RECUBIERTA DE CU, PARA PUESTA A T	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	9.02	18.03
020105555000	AISLADOR ESPIGA (PIN), PORCELANA, CON RADIO INTERF	6.00	6.00	6.00	0.00	0.00	0.00	5.45	32.69
020511015000	AISLADOR DE SUSPENSION, POLIMERICO, 15 KV, ANSI DS	12.00	12.00	12.00	0.00	0.00	0.00	14.91	178.95
040315060000	CABLE DE CU, CABLEADO, 600 V, THHN, 2 AWG, 7 HILOS	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00	4.05	161.96
040320072000	CABLE DE CU, CABLEADO, 600 V, TTU, 20 AWG, 7 HILOS	120.00	120.00	120.00	0.00	0.00	0.00	6.67	800.81
050113260000	ABRAZADERA DE 3 PERNOS, PLETINA ACERO GALVANIZADO	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	7.19	14.38
050114140000	ABRAZADERA DE 4 PERNOS, PLETINA ACERO GALVANIZADO	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	6.58	13.15
050114160000	ABRAZADERA DE 4 PERNOS, PLETINA ACERO GALVANIZADO	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	7.40	14.80
051082000000	CRUCETA DE ACERO GALVANIZADO, UNIVERSAL, PERFIL "L"	6.00	6.00	6.00	0.00	0.00	0.00	36.93	221.80
051505127000	HORQUILLA DE ACERO GALVANIZADO PARA ANCLAJE, 12, 7	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
052019305000	PERNO PIN DE ACERO GALVANIZADO, ROSCA PLASTICA DE	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
052116457005	PERNO PIN PUNTA DE POSTE SIMPLE DE ACERO GALVANIZA	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
052512038000	PERNO MAQUINA DE ACERO GALVANIZADO, TUERCA, ARANDE	36.00	36.00	36.00	0.00	0.00	0.00	0.41	14.62
052816254000	PERNO OJO DE ACERO GALVANIZADO, 4 TUERCAS, ARANDEL	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	5.59	22.36
053216254000	PERNO ROSCA CORRIDA DE ACERO GALVANIZADO, 4 TUERCA	4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	2.66	10.64
053216306000	PERNO ROSCA CORRIDA DE ACERO GALVANIZADO, 4 TUERCA	10.00	10.00	10.00	0.00	0.00	0.00	3.51	35.10
053516052000	PERNO "U" DE ACERO GALVANIZADO, 2 TUERCAS, ARANDEL	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	3.11	6.21
054038070000	PIE AMIGO DE ACERO GALVANIZADO, PERFIL "L" 38 X 38	10.00	10.00	10.00	0.00	0.00	0.00	6.82	68.21
055201016000	TUERCA DE OJO OVALADO DE ACERO GALVANIZADO, PERNO	8.00	8.00	8.00	0.00	0.00	0.00	1.23	9.83
080631002000	TIRAFUSIBLE, CABEZA FLJA, TIPO K, 2 A.	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	2.87	5.73
081201010000	PARARRAYOS CLASE DISTRIBUCION POLIMERICO, OXIDO ME	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
081914320000	SECCIONADOR BARRA, UNIPOLAR, ABIERTO, ROMPEARCO, 1	12.00	12.00	12.00	0.00	0.00	0.00	241.97	2,903.61
141703200000	RECONECTADOR AUTOMATICO, TRIPOLAR, 27 KV, BIL 150 K	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	25,648.00	51,296.00
1043	INST. ESTRUCTURA TIPO 3CD 13.8KV	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.78	97.56
1403	MONTAJE E INSTALACION DE RECONECTADOR 3F	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	146.87	587.48

TOTAL MATERIALES: \$ 56,221.03
MANO DE OBRA: \$ 685.04
TRANSPORTE: \$ 0.00
IVA: \$ 0.00
TOTAL FISCALIZACION: \$ 56,906.07

EJECUTOR	FISCALIZADOR	DIRECCION
----------	--------------	-----------

Figura 72: Costo referencial de accesorios y mano de obra para instalación de reconector.
 Elaborado por CNEL SUC.

Por lo tanto el costo total para instalar un Reconector Automático tripolar es de **28,565.04 USD**, adicionalmente a ello también se debe considerar los costos de mantenimiento del equipo.