



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE
CONTINGENCIAS CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD A
TRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: BRANDON DAVID GUANOLUISA

PANCHI

TUTOR: JORGE PAUL MUÑOZ PILCO

Quito -Ecuador

2024

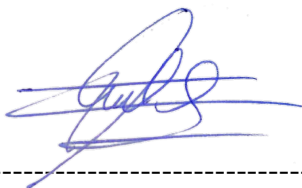
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Brandon David Guanoluisa Panchi con documento de identificación N° 1719987461 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 18 de marzo del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Brandon David Guanoluisa Panchi', written over a horizontal dashed line.

Brandon David Guanoluisa Panchi

1719987461

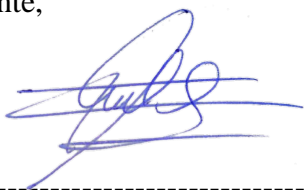
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Brandon David Guanoluisa Panchi con documento de identificación No. 1719987461, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Reconfiguración de sistemas de distribución ante contingencias considerando restricciones de cargabilidad a través de algoritmo genético”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de marzo del año 2024

Atentamente,



Brandon David Guanoluisa Panchi

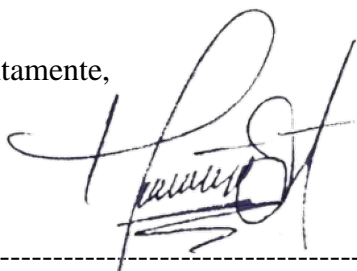
1719987461

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco con documento de identificación N° 1719006189, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE CONTINGENCIAS CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD A TRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO, realizado por Brandon David Guanoluisa Panchi con documento de identificación N° 1719987461, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de marzo del año 2024

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jorge Paúl Muñoz Pilco', written over a horizontal dashed line.

Ing. Jorge Paúl Muñoz Pilco, MSc

1719006189

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Sistemas de distribución.....	3
2.1.1	Distribución eléctrica	3
2.1.2	Topológica de redes distribución eléctrica	3
2.1.3	Niveles de tensión	4
2.2	Confiabilidad del sistema de distribución.	4
2.3	Expansión de un sistema de distribución	5
2.3.1	Planificación del sistema de distribución	5
2.3.2	Tipos de planificación	5
2.4	Reconfiguración en redes de distribución	5
2.4.1	Reestructuración de Alimentadores primarios	6
3	Planteamiento del problema	7
3.1	Algoritmo genético AG.....	7
3.2	Parámetros de los Algoritmos Genéticos	7
3.3	Ventajas y desventajas de algoritmos genéticos	8
3.4	Optimización de Redes Eléctricas	8
3.5	Función Objetivo.....	8
4	Metodología.....	9
4.1	Primer caso de estudio	10
4.2	Segundo caso de estudio.....	10
4.3	Tercer caso de estudio	10
4.4	Cuarto caso de estudio.....	10
5	Análisis de resultados.....	11
5.1	Contigencia línea 8-10.....	11
5.2	Contigencia línea 25-26.....	12
5.3	Contingencia línea 25-30	13
5.4	Contigencia línea 30-31.....	14
6	Conclusiones.....	15
6.1	Trabajos futuros	15
7	Referencias.....	15
7.1	Matriz de Estado del Arte	19
7.2	Resumen de Indicadores	22
8	Anexos.....	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Topología radial.....	3
Figura 2. Topología anillo.....	4
Figura 3. Topología mallada.....	4
Figura 4. Índices de confiabilidad.....	4
Figura 5. Elementos de sistema de distribución.....	6
Figura 6. Principios de algoritmo genético.....	6
Figura 7. Parámetros de Algoritmo genético.....	7
Figura 8. Cadena genética.....	8
Figura 9. Sistema de 34 nodos de la IEEE.....	9
Figura 10. Contingencia en línea 8-10.....	10
Figura 11. Contingencia en línea 25-26.....	10
Figura 12. Contingencia en línea 25-30.....	10
Figura 13. Contingencia en línea 30-31.....	11
Figura 14. Cargabilidad del sistema base.....	11
Figura 15. Perfil de voltaje del sistema base.....	11
Figura 16. Perfiles de voltaje.....	11
Figura 17. Cargabilidad del sistema.....	12
Figura 18. Cargabilidad. Caso base vs Solución óptima.....	12
Figura 19. Perfil de voltaje. Caso base vs Solución óptima.....	12
Figura 20. Sistema reconfigurado - Caso 1.....	12
Figura 21. Cargabilidad. Caso base - Solución óptima.....	13
Figura 22. Perfiles de voltaje. Caso Base - Solución óptima.....	13
Figura 23. Sistema reconfigurado - Caso 2.....	13
Figura 24. Cargabilidad. Caso base - Solución óptima.....	13
Figura 25. Perfiles de voltaje. Caso Base - Solución óptima.....	14
Figura 26. Sistema reconfigurado - Caso3.....	14
Figura 27. Cargabilidad. Caso base - Solución óptima.....	14
Figura 28. Perfiles de voltaje. Caso Base - Solución óptima.....	14
Figura 29. Sistema reconfigurado - Caso 4.....	14
Figura 30. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	22
Figura 31. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	22
Figura 32. Indicador de solución - Estado del arte.....	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de tensión.	4
Tabla 2: Matriz de estado del arte.	19
Tabla 3. Datos de líneas del sistema IEEE de 34 barras.	23
Tabla 4. Configuración de líneas.....	24
Tabla 5. Datos de cargas del sistema IEEE de 34 barras.	24
Tabla 6. Datos del transformador	25
Tabla 7. Datos de los voltajes iniciales.	25
Tabla 8. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso1.....	26
Tabla 9. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso1.	26
Tabla 10. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso2.....	27
Tabla 11. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso 2.	27
Tabla 12. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso 3.....	28
Tabla 13. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso 3.	28
Tabla 14. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso 4.....	29
Tabla 15. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso 4.	29

RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION ANTE CONTINGENCIAS CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD A TRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO

Resumen

En este artículo se propone una metodología para solventar la dificultad que se presenta al momento de la restauración del servicio eléctrico en sistemas de distribución (SD) de topología radial frente a contingencias, con el objetivo de minimizar la carga desconectada, teniendo en cuenta restricciones como la cargabilidad de las líneas y perfiles de voltaje. Para el problema se propone resolver a través del algoritmo genético, el cual se lo desarrolla en el software MATLAB, el algoritmo se fundamenta a través de la función objetivo, la cual tiene la finalidad de minimizar la carga que no tiene energía y mediante los indicadores de sensibilidad permiten encontrar la óptima reconfiguración de la red para así poder restaurar el servicio. Para la simulación del algoritmo genético (AG) se lo implementa en el sistema de prueba del IEEE de 34 nodos, en donde se presenta 4 casos de estudio y justificará los resultados del algoritmo por medio de gráficas comparativas.

Palabras Clave: Reconfiguración de Redes, Cargabilidad de Líneas, Contingencias, Sistema de Distribución, Algoritmo Genético.

Abstract

In this article a methodology is proposed to solve the difficulty that arises at the time of restoration of electrical service in radial topology distribution systems (DS) in the event of contingencies, with the objective of minimizing the disconnected load, considering restrictions such as the chargeability of the lines and voltage profiles. For the problem it is proposed to solve through the genetic algorithm, which is developed in MATLAB software, the algorithm is based on the objective function, which aims to maximize the load that has no energy and through the sensitivity indicators allow finding the optimal Reconfiguration of the network to restore the service. For the simulation of the genetic algorithm (GA), it is implemented in the IEEE test system of 34 nodes, where 4 case studies are presented, and the results of the algorithm are justified by means of comparative graphs.

Keywords: Network Reconfiguration, Line Chargeability, Contingencies, Distribution System, Genetic Algorithm.

1 Introducción

Los sistemas de distribución son parte del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) cuyo principal objetivo es disponer de energía eléctrica de calidad y confiable a los consumidores [1]. El consolidar la red de distribución eléctrica para ofrecerle confiabilidad a un sistema es uno de los objetivos a corto y mediano plazo. La red eléctrica a lo largo del tiempo ha experimentado grandes cambios debido al constante crecimiento poblacional e intervención de nuevas tecnologías de generación [2], [4].

Si bien es cierto, para mejorar índices de confiabilidad ante cualquier eventualidad de orden natural dentro de un sistema de distribución a gran escala, conllevaría un análisis y operación de mayor complejidad al requerir maniobras y toma de decisiones de los operadores. Por ello, es fundamental implementar softwares informáticos que puedan analizar y reconfigurar la infraestructura de la red de distribución a partir de un análisis óptimo en tiempo real [3]. Cuando el centro de control detecta una falla permanente, se toman medidas para restaurar el funcionamiento normal del sistema. Los operadores deben usar un juicio preciso y adecuado para lograr esto, lo que requiere el uso de herramientas informáticas que puedan dirigir de manera efectiva el proceso de restauración del servicio eléctrico [5].

En [6], indica que en 1975 Merlin y Back plantearon por primera vez la reconfiguración de circuitos, en donde proponen como función objetivo minimizar la pérdida de potencia sin considerar restricciones operativas.

El autor en [5], enfatiza que la principal metodología para restablecer el servicio eléctrico ante una contingencia es la reconfiguración de la red de distribución, en donde a través de las técnicas heurísticas

implementadas en 1988 y 1990, basadas en programación lineal y algoritmos genéticos, que permiten transferir cargas entre distintos alimentadores del sistema que se puede lograr a través de la estructura que presenta los dispositivos de protección que son de apertura y cierre.

Linares y Ríos en [7], exponen un método para reconfigurar redes de distribución con el propósito de maximizar la carga que está por fuera del servicio, teniendo en cuenta indicadores de sensibilidad como perfiles de voltaje, cargabilidad de los conductores y manteniendo una topología radial.

En [8], plantea una fase de reconfiguración para los sistemas de distribución en donde se tiene como objetivo encontrar la mejor topología del sistema con respecto a las pérdidas de energía, la demanda y el rendimiento operativo. Además, menciona que para modelos complejos se aplican métodos heurísticos y metaheurísticos como algoritmos genéticos, colonia de hormigas y enjambre de partículas.

En [9], citan a Watanabe y Nodu los cuáles presentan una solución frente al problema que existe al momento de restablecer el servicio en sistemas pequeños de distribución, utilizando un algoritmo genético en dos pasos con el objetivo de reducir la pérdida de energía. En el primer paso se involucra la creación de redes con topología radial, y en el segundo paso se optimiza la secuencia de funcionamiento de los dispositivos abiertos y/o cerrados para minimizar la pérdida de energía.

En el presente artículo se expone el problema de optimización que existe al momento de realizar la restauración del servicio eléctrico ante contingencias, el cual se encuentra expuesto a las limitaciones operativas. Siendo así que, la función

objetivo del problema está orientada en restaurar a la mayor cantidad de carga que se encuentra sin servicio, teniendo en cuenta restricciones como la cargabilidad de los conductores, perfiles de voltaje y mantener una topología radial en el sistema. Para la solución del problema se realiza por medio del algoritmo genético, el cual a través de las limitaciones operativas guía el proceso para restaurar el servicio. Los resultados de la metodología aplicada se obtendrán del sistema de la IEEE de 34 nodos.

El artículo presentado está dividido de la siguiente forma: en la sección dos se describe el marco teórico en donde se exponen los fundamentos del sistema de distribución. Sección tres, presenta el problema que existe en la restauración de los sistemas eléctricos de distribución, a continuación, se muestra la sección cuatro la cual expone la metodología para resolver el problema junto con los casos de estudio. En la sección cinco se realiza el análisis de resultados y finalmente en la sección seis, se termina desarrollando las conclusiones del artículo.

2 Marco teórico

2.1 Sistemas de distribución

Un sistema eléctrico de distribución se compone de diferentes elementos y a través de estos se transporta la energía eléctrica hacia los usuarios finales, este sistema es tan complejo, ya que debe poseer seguridad y confiabilidad.

Las redes de subtransmisión y subestaciones son complementos del sistema de distribución porque se encargan de reducir el voltaje que llega de transmisión para así tener correctos niveles de tensión para la distribución [10].

2.1.1 Distribución eléctrica

El sistema de distribución eléctrica se encuentra entre la transmisión y los usuarios finales, donde su rol es suministrar correctos niveles de tensión, el cual está conformado por acometidas, redes de baja tensión, empalmes, transformadores, medidores entre otros.

Este sistema de distribución debe ser diseñado de manera que sea seguro y eficiente, esto indica que el sistema tiene que estar preparado ante cualquier inconveniente que se presente con el objetivo de minimizar costos considerando el correcto funcionamiento del sistema [10], [11].

2.1.2 Topológica de redes distribución eléctrica

La topología define como está estructurado las redes de distribución eléctrica. En el siguiente apartado se indica las configuraciones más utilizadas en sistemas de distribución [12].

a. Sistemas radiales

Esta configuración se caracteriza por alimentarse desde un solo punto y a partir de este se suministra hacia las demás, la desventaja que presenta es al momento de no existir suministro en el punto, todos los conectados desde ese punto se quedan desenergizado y esto se interpreta como un sistema conectado en serie [13].

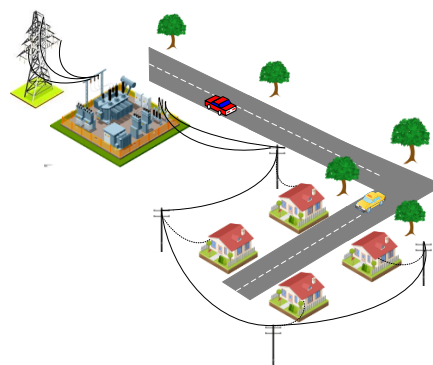


Figura 1. Topología radial.

b. Sistemas en anillo

Este tipo de configuración se conectan todos los usuarios entre sí de manera que cierran el circuito, esto se traduce como un anillo y mejora la confiabilidad [12].

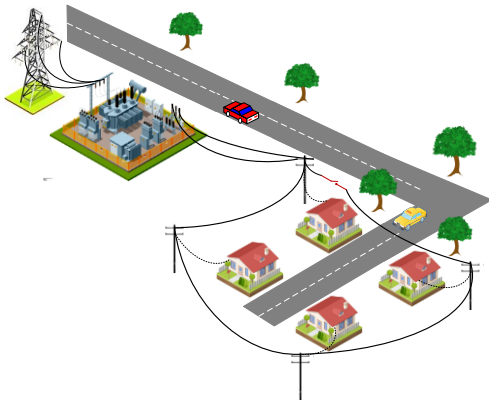


Figura 2. Topología anillo.

c. Sistemas mallados

Este sistema tiene mayor interconexión y debido a esto se eleva su nivel de confiabilidad, sin embargo, al implementarlo se considera un costo elevado, debido a que se agregan más redes eléctricas [13].

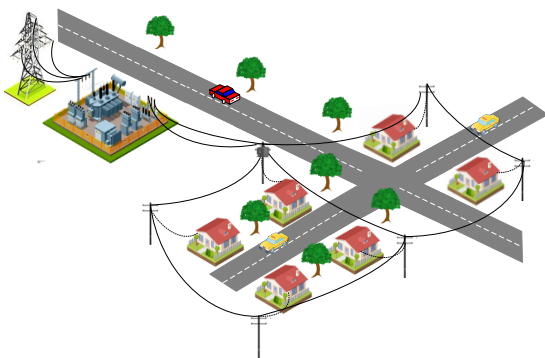


Figura 3. Topología mallada.

2.1.3 Niveles de tensión

En la tabla 1 se definen los valores correspondientes a los niveles de tensión que presentan los sistemas eléctricos de distribución [14], [15].

Tabla 1. Niveles de tensión.

Red	Niveles de voltaje
Bajo voltaje	≤ 0.6 [kV]
Medio voltaje	>0.6 [kV] ≤ 13.8 [kV]
Alto voltaje Grupo 1	>40 [kV] ≤ 138 [kV]
Alto voltaje Grupo 2	>138 [kV]

2.2 Confiabilidad del sistema de distribución.

Para que un sistema eléctrico de distribución se denomine confiable los componentes de la red deben operar correctamente dentro de los parámetros establecidos [16].

Además de lo anterior, la confiabilidad se relaciona con la capacidad del sistema en proveer un adecuado suministro de energía eléctrica. Sin embargo, se necesita interpretar como se comporta el sistema y esto se lo hace a través de indicadores de confiabilidad [17].

Índices de confiabilidad

Estos indicadores están diseñados para proporcionar una representación cuantitativa de la calidad del servicio eléctrico [18].

A continuación, se presenta un mapa conceptual con los índices de confiabilidad orientados al consumidor.

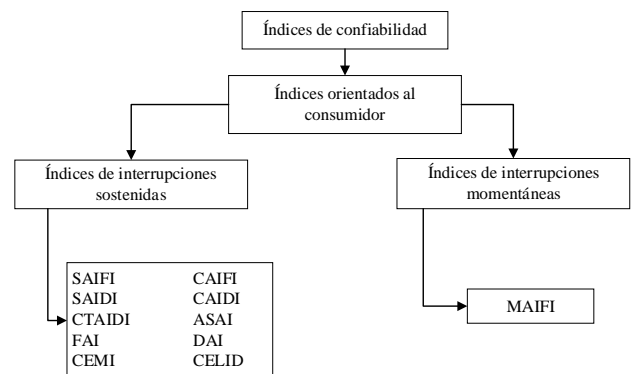


Figura 4. Índices de confiabilidad.

2.3 Expansión de un sistema de distribución

Un sistema de distribución es muy complejo, debido a que posee gran cantidad de interconexiones y fuentes, estos sistemas cumplen con la función de proveer un servicio de calidad, considerando la confiabilidad y el mínimo costo [19].

Para realizar la planificación del sistema de distribución se toma en consideración ciertas restricciones como son los costes de instalación, fiabilidad y minimización de pérdidas de potencia. Considerando lo anterior se utilizan variedad de algoritmos, los cuales buscan un diseño óptimo de entre todas las posibilidades existentes [20].

2.3.1 Planificación del sistema de distribución

Debido al gran número de algoritmos eficaces e innovadores que existen, se los puede clasificar de acuerdo con el diseño planificado en la red.

a. Nueva red de distribución

Esta se implementa en zonas urbanas, polígonos industriales o barrios residenciales, en donde se desarrolla una nueva red de distribución a partir de la demanda, además se la puede utilizar en redes existentes, simulando una comparación con la red existente y la nueva red, la cual sería óptima.

b. Expansión y planificación de la red de distribución existente

Esta busca optimizar los costos que implican las nuevas instalaciones con respecto a la expansión de la red, guiándose en el crecimiento de la demanda [21].

c. Elementos de operación, líneas de distribución y protección

Se implementa en redes existentes y tiene la finalidad de optimizar la reconfiguración de líneas, ubicación y tamaño de dispositivos

de protección, con el objetivo de incrementar la operabilidad y beneficiarse de red existente [11].

2.3.2 Tipos de planificación

Los sistemas de distribución eléctrica se encuentran siempre en continuo crecimiento por ende es difícil determinar la demanda ,esto genera la búsqueda de una solución óptima en donde tenga como objetivo la minimización de costos [19].

a. Métodos exactos y/o programados

Las planificaciones que utilizan métodos exactos para la optimización al momento de resolver el problema presentan 3 dificultades:

- Uso de variables discretas.
- Fuerte no-linealidad.
- Incertidumbre que la carga demanda.

b. Métodos heurísticos y metaheurísticos

En la actualidad los métodos heurísticos y metaheurísticos son los más empleados en la planificación de la red de distribución, y a partir de cálculos encuentran y seleccionan las soluciones más factibles cercanas a la óptima, a partir de búsquedas locales, costes de inversión, energía no suministrada y las sobrecargas [19], [20].

2.4 Reconfiguración en redes de distribución

La reconfiguración en las redes de distribución en los alimentadores primarios busca una mejora en la que emplea las características de la topología, con el fin de modificarla, con esto intenta reducir pérdidas eléctricas y el número de clientes afectados por una suspensión eléctrica.

La reconfiguración de los alimentadores hace referencia a la alteración de la estructura topológica, en donde se interactúa con la apertura o cierre de los seccionadores e interruptores [4], [22].

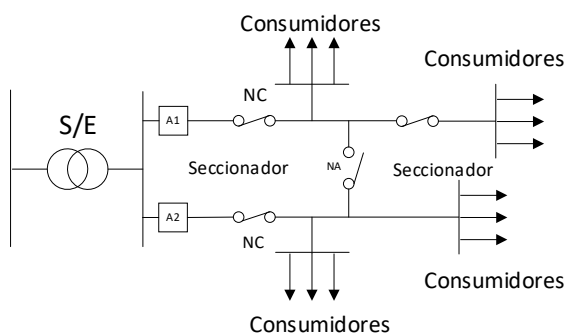


Figura 5. Elementos de sistema de distribución.

2.4.1 Reestructuración de Alimentadores primarios

Para realizar la reestructuración de los alimentadores primarios se debe verificar que está presente la seguridad, en las maniobras de transferencias, en condiciones de contingencias, número de maniobras, para así conseguir reducción en los valores de energía no servida y brindar un eficiente servicio eléctrico hacia los usuarios [23], [24].

Restricciones

- Conservar la configuración radial.
- Correcto funcionamiento de los dispositivos de protección.
- Respetar los límites establecidos de los perfiles de voltaje.
- Establecer límites de cargabilidad en los conductores.

Rentabilidad

- Protección de los alimentadores ante fallas.
- Restablecimiento del servicio.
- Reducción de interrupciones de suministro.
- Restablecimiento del servicio eléctrico [23], [25].

Técnicas y métodos

En el siguiente apartado se indican los métodos y técnicas para reconfiguración de alimentadores:

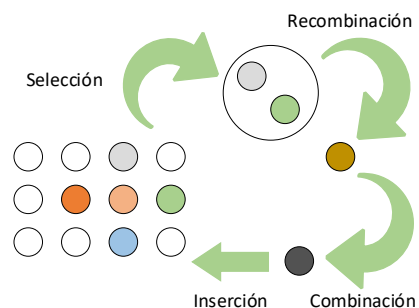


Figura 6. Principios de algoritmo genético.

a. Heurísticas

Esta metodología proporciona una solución que se aproxima a la óptima, considerando la necesidad de obtener resultados en tiempos de solución reducidos.

b. Programación Matemática

Esta se emplea para la planificación con respecto a la expansión y operación. Tenemos a la programación lineal como ejemplo, donde el objetivo es minimizar el costo de capital.

c. Lógica Difusa

Esta se combina con los métodos heurísticos. Se diferencian porque parten de un sistema enmallado y al reconfigurarlo lo hace con menores pérdidas que en sistema inicial.

d. Redes neuronales

Este método emplea factores de peso con respecto a la interconexión de las neuronas de x sistema, para luego evaluar posibles soluciones.

e. Algoritmos genéticos

Son métodos adaptativos, es decir que los procesos están basados en la evolución, que involucra una población inicial de individuos y cada individuo de la población inicial presenta una solución óptima [23].

3 Planteamiento del problema

El principal problema que existe en la restauración del servicio frente a una contingencia es encontrar la reconfiguración óptima que permita energizar a la mayor cantidad de usuarios que sea posible, esta reconfiguración aparece a partir del accionamiento correcto de los dispositivos de seccionamiento que permiten la transferencia de carga, y que están sujetas a restricciones operativas del sistema, como voltajes nodales y cargabilidad de los conductores para así mantener una calidad hacia los usuarios. Adicionalmente tener en cuenta que el sistema debe mantener una topología radial, ya que normalmente los SD operan con este tipo de topología [23], [24], [26].

El problema que existe en la restauración del servicio se concentra en la posición de los dispositivos de seccionamiento existentes en las líneas, con el objetivo de determinar que cumplan con las restricciones operativas [27]. Correspondiente a cada uno de los dispositivos de seccionamiento, se los representa como una variable binaria, en donde es cero cuando está abierto y uno cuando está cerrado, esto representa que la línea se encuentra desenergizado o energizada, según corresponda.

Existen diferentes métodos que permiten seleccionar que dispositivos deben abrirse o cerrarse con la finalidad de conseguir una solución óptima, con base a lo antes mencionado el problema se lo interpreta como combinatorio, y su resolución se la realiza a partir de técnicas metaheurísticas o heurísticas para así encontrar la secuencia correcta en la que se deben accionar los dispositivos.

3.1 Algoritmo genético AG

Este algoritmo se caracteriza por ser uno de los más populares y sencillos de entre los muchos Algoritmos Evolutivos, ya que

presenta soluciones eficientes al problema que se plantea con más detalle [22].

3.2 Parámetros de los Algoritmos Genéticos

Para implementar un Algoritmo Genético (AG), es necesario tomar en cuenta diversos parámetros que afectan su funcionamiento y rendimiento. Algunos de estos parámetros clave son:

a. Tamaño de la población

Indica el número de individuos en una población determinada. Este parámetro determina la optimización del algoritmo debido a que realiza una serie de cálculos sobre la población actual y las soluciones entregadas dependerá del tamaño de la población [28], [29].

b. Probabilidad de mutación

Este parámetro señala el proceso mediante el cual la población genera nuevos individuos que son diferentes de los individuos iniciales, a partir de una alteración pequeña en los genes padres [30], [31].

c. Probabilidad de cruce

Este parámetro indica sobre la reproducción entre individuos, en donde existe intercambio de información genética de los iniciales, para que así, el nuevo individuo sea también válida [32], [33].

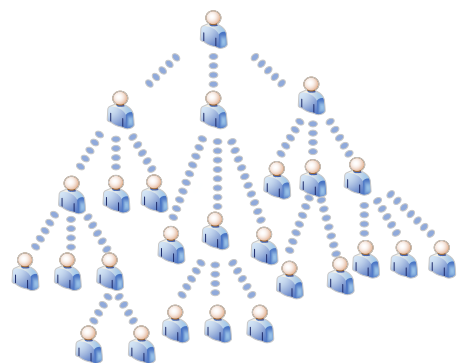


Figura 7. Parámetros de Algoritmo genético.

3.3 Ventajas y desventajas de algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos presentan ciertas ventajas y desventajas al momento de implementarlos:

a. Ventajas

- Operan de forma simultánea entregando varias soluciones.
- Trabajan con problemas no lineales.
- Se adaptan a diferentes sistemas.
- Manipulan diferentes parámetros a la vez.

b. Desventajas

- Utilizan lenguaje robusto para soportar cambios aleatorios.
- Los parámetros deben ser bien establecidos para evitar errores.
- Convergencia prematuramente [34].

3.4 Optimización de Redes Eléctricas

Debido a que el Algoritmo genético es eficaz y útil se lo implementa en la reconfiguración de redes de distribución y para realizarlo se debe parametrizar correctamente y además presentar las siguientes características:

a. Cadena genética

La cadena genética busca memorizar la configuración radial, con solo enumerar las posiciones de los interruptores abiertos, para así evitar representar el estado de cada complemento del sistema de distribución eléctrica [35].

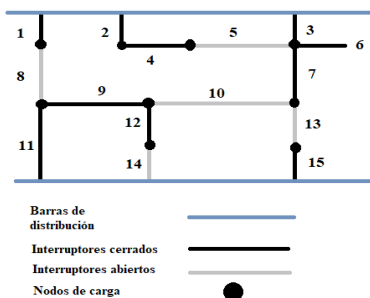


Figura 8. Cadena genética.

b. Función de adaptabilidad

Esta función es importante, ya que orienta la búsqueda del algoritmo genético a través de una función objetivo sujeta a restricciones, evitando así que explore soluciones aleatorias sin rumbo definido [22].

Existen varias opciones de reconfiguración al momento que ocurre una contingencia, esto genera un desafío computacional, especialmente si se involucran múltiples cálculos de flujo de potencia. La reconfiguración de la red debe mantener un esquema de protección simple y presentar un nivel aceptable de confiabilidad hacia los usuarios [26], [36].

3.5 Función Objetivo

A continuación, se detalla la función objetivo, determinada por la ecuación (1) la cual ha sido formulada y proyectada como modelo no lineal entero mixto, que tiene como finalidad minimizar la carga que esta por fuera del servicio frente a una contingencia.

$$MaxZ = \sum_{K \in R}^n LK * YK \quad (1)$$

Donde:

LK Carga de nodo K.

YK Variable binaria de decisión del problema.

R Conjunto de cargas desenergizado.

Sujeto a:

$$I_{ij} \leq I_{max} \quad (2)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (3)$$

$$N_r = N_n - 1 \quad (4)$$

I_{ij} Corriente entre los nodos i y j.

I_{max} Corriente máxima que soporta un conductor.

V_{min} Voltaje nodal mínimo permitido.

V_{max} voltaje nodal máximo permitido.

Nr número de ramas conectadas del sistema.
Nn número total de nodos conectados del sistema.

Para el desarrollo del algoritmo genético se lo realiza con base al modelo matemático, en donde la ecuación (1) establece como objetivo encontrar la reconfiguración óptima ante una contingencia, mediante la cual se pretende restaurar la energía no servida, tomando en cuenta las restricciones descritas en la ecuación (2), (3) y (4) que describen la cargabilidad de los conductores, límites de voltaje que deben respetar cada uno de los nodos y que la red mantenga una topología radial, respectivamente.

4 Metodología

Al comprender que existen varias opciones al momento de realizar la reconfiguración de la red frente a una contingencia, el algoritmo genético permitirá encontrar la óptima reconfiguración, es decir, que el resultado del algoritmo tendrá que cumplir con las restricciones operativas establecidas

Algoritmo de Optimización del Sistema de Distribución

Inicio

Paso 1: Cargar el sistema de la IEEE 34 nodos.
 Realizar flujo de potencia
 Generar una falla eléctrica dentro del sistema.

Paso2: Iniciar el AG
 Valores de Entrada.
 Población Inicial → IniPob
 Generación. → P_{dmin}, Q_{dmax}
 Demanda → P_d, Q_d
 Líneas → X, R, P_{lmax}
 Límites de Voltaje → V_{min}, V_{max}
 Límites de cargabilidad → 0%, 100%

Paso 3: Inicializa la población aleatoriamente
 For i=1: length(IniPob)
 Conf(rand(4,round(4-3)))=1
 End for

Paso 4: Evaluar la población
 Cálculo del flujo de potencia

Mathpower
 Result= Runpf(caso_base)
 V=Result.bus(:,8)
 Pij = Result.branch(:,11)
 Carga = Pij/Plmax

Paso 5: Evalúa las mejores soluciones
 Bajo criterio
 For i=1:length(Inipob)
 Vmin < V < Vmax
 0 < Carga < 100%
 End for

Paso 6: Mutación y cruzamiento
 Padres = mejores V
 Cruce = padres*0.8% cambios entre padres
 Mutación = cruce*0.1% aleatoriedad

Paso 7: Paso 3 hasta obtener resultados favorables

Paso 8: Obtener la mejor respuesta optimizada

Fin

El análisis de resultados se lo realiza en el sistema de distribución de 34 nodos de la IEEE, los datos del modelo se encuentran en la sección de Anexos. Este sistema permitirá verificar la efectividad del algoritmo genético. La simulación de dicho modelo se llevó a cabo mediante el software MATLAB.

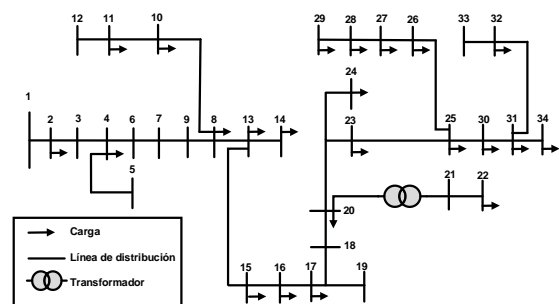


Figura 9. Sistema de 34 nodos de la IEEE.

Es importante considerar que dentro de un sistema eléctrico las contingencias son impredecibles, por ello el algoritmo genético permite encontrar una solución óptima ante cualquier eventualidad, sin embargo, existen zonas dentro del sistema que el software MatPower por características propias de simulación las considera críticas, lo que conlleva que

existan casos, en los cuales se descartarán posibles simulaciones.

Con base a lo antes mencionado se presentarán 4 casos de estudio, donde se simularán en cada uno de ellos una contingencia y con la implementación del algoritmo genético se encontrará la óptima reconfiguración de la red.

4.1 Primer caso de estudio

Para el desarrollo del primer caso de estudio se simula una contingencia en la línea 8-10 como se expone en la Figura 10. El primer paso es aislar la zona de falla a través de los dispositivos de protección, para luego identificar la zona que quedó sin energía; después se procede con la implementación del AG, con el fin de encontrar la configuración más eficaz de la red y poder restablecer el servicio.

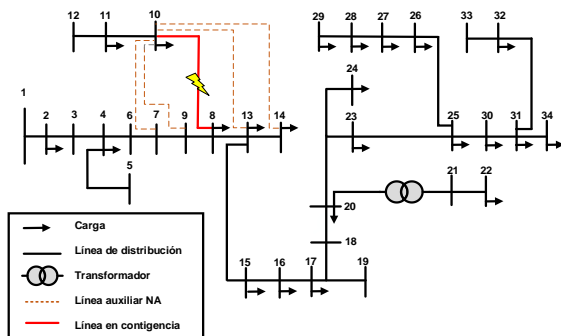


Figura 10. Contingencia en línea 8-10.

4.2 Segundo caso de estudio

En el segundo caso de estudio se simula una contingencia en la línea 25-26 como se muestra en la Figura 11. Se procede a aislar la zona de falla a través de los dispositivos de protección, para después identificar la zona que quedó sin energía y poder proceder con la implementación del AG, el cual permite encontrar la óptima reconexión de la red, a fin de restablecer el servicio.

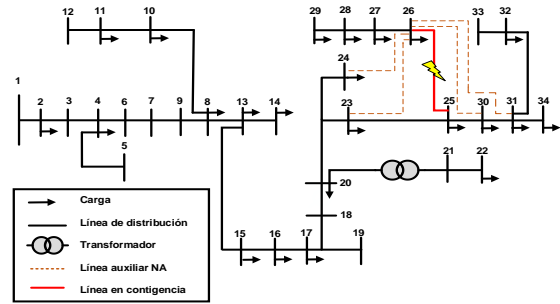


Figura 11. Contingencia en línea 25-26.

4.3 Tercer caso de estudio

En el tercer caso de estudio se simula una contingencia en la línea 25-30 como se muestra en la Figura 12. Se identifica la zona de falla y se procede a aislar mediante los dispositivos de protección, se identifica la zona que quedó sin energía y se procede con la implementación del AG, con la finalidad de encontrar la óptima reconfiguración de la red y poder restablecer el servicio.

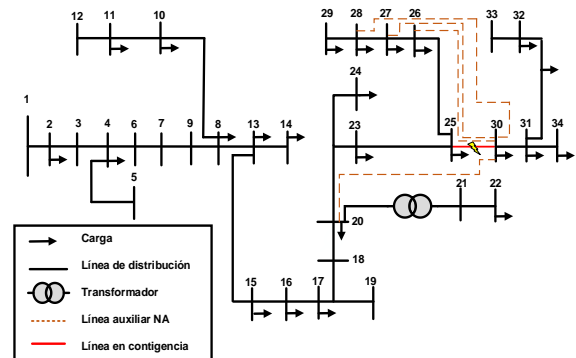


Figura 12. Contingencia en línea 25-30.

4.4 Cuarto caso de estudio

En el cuarto caso de estudio se simula una contingencia en la línea 30-31 como se expone en la Figura 13. Se identifica la zona de falla y se procede a aislar mediante los dispositivos de protección, para luego ubicar la zona que quedó sin energía y poder proceder con la implementación del AG, el cual permite encontrar la óptima reconfiguración de la red y poder restablecer el servicio.

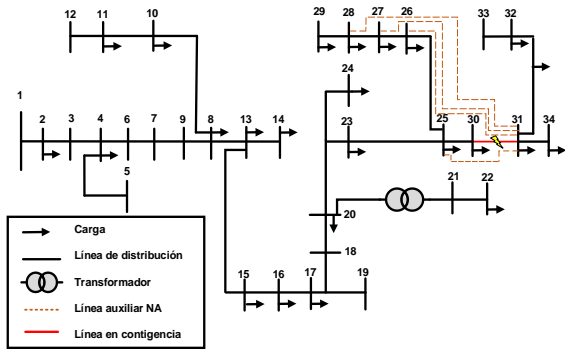


Figura 13. Contingencia en línea 30-31.

5 Análisis de resultados

En esta sección, se llevará a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos para cada caso de estudio, respaldando así la implementación del AG.

A continuación, en la Figura 14 se presentan los valores iniciales correspondientes a la cargabilidad de los conductores del sistema de distribución de 34 nodos de la IEEE. Así también, en la Figura 15, se detallan los perfiles de voltaje correspondientes a dicho sistema.

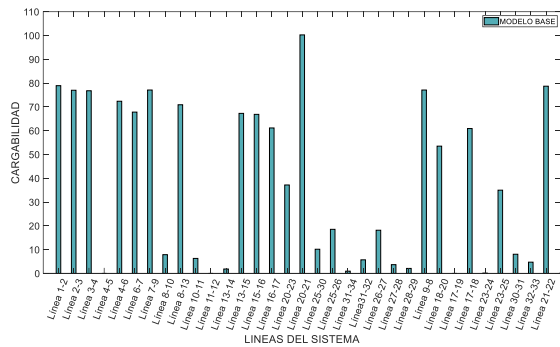


Figura 14. Cargabilidad del sistema base.

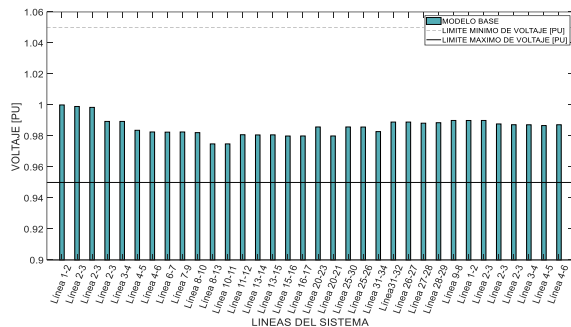


Figura 15. Perfil de voltaje del sistema base.

5.1 Contingencia línea 8-10

En el primer caso de estudio se simula una contingencia en la línea 8-10, y para solventar este problema, se procede a reconfigurar el sistema. En donde las posibles reconexiones para restaurar el servicio son las líneas 10-7, 10-9, 10-13 y 10-14 conforme se denota en la Figura 10.

A continuación, en la Figura 16 se indican los resultados de perfiles de voltaje en [pu], en donde se observa que la posible reconexión respecto al parámetro de voltaje es la línea 10-9 la cual sobresale de las demás. Sin embargo, para que esta sea la solución óptima se debe verificar la cargabilidad del sistema. Véase en la Figura 17.

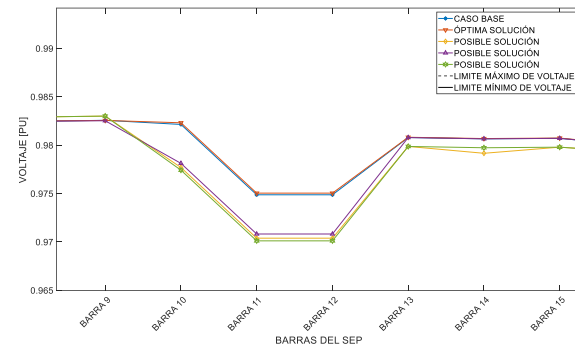
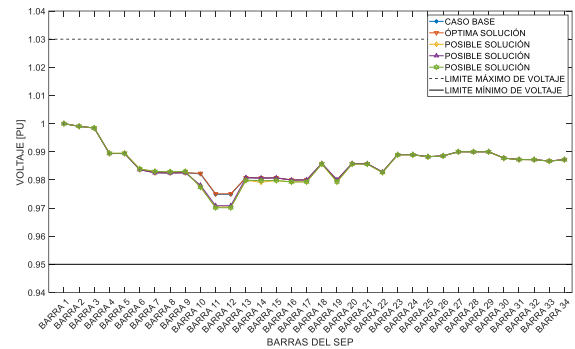


Figura 16. Perfiles de voltaje.

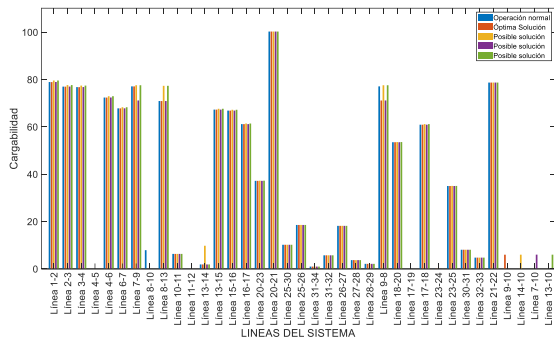


Figura 17. Cargabilidad del sistema.

Se verifica que la línea 9-10 es la solución óptima, puesto que la cargabilidad y los perfiles de voltaje que se presentan son los ideales para que el sistema opere de manera eficiente y brindando una buena calidad de servicio. Sin embargo, se puede apreciar que en los escenarios de reconexión 10-7, 10-13 y 10-14; la cargabilidad se ve afectada en algunas líneas del sistema, de igual manera se debe tomar en cuenta el comportamiento del voltaje para cada barra del sistema, poniendo en consideración lo antes mencionado, estas reconexiones se descartan debido a que existe el escenario 9-10 con mejores índices de cargabilidad y voltaje.

Con base a las anteriores Figuras, se puede validar que el AG de entre todas las posibles conexiones, escoge la óptima; y para este caso es la línea 9-10. En las Figuras 18 y 19, se presentan la cargabilidad y los perfiles de voltaje del caso base, junto con la nueva reconfiguración, es decir los nuevos valores que se presentan al conectar la línea 9-10, los cuales cumplen con las restricciones; y por tanto se convierte en la solución óptima para restaurar el servicio.

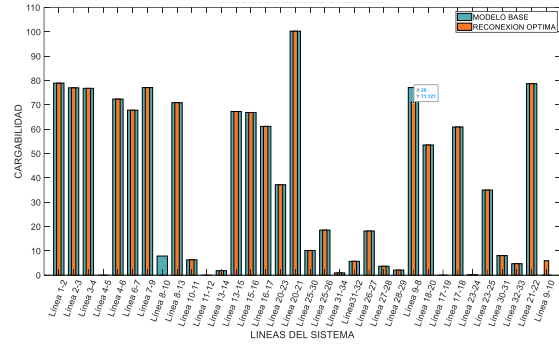


Figura 18. Cargabilidad. Caso base vs Solución óptima.

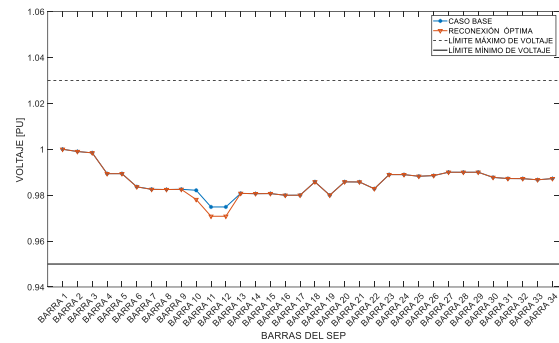


Figura 19. Perfil de voltaje. Caso base vs Solución óptima.

Para finalizar el caso de estudio en la Figura 20 se expone el nuevo sistema con la conexión óptima.

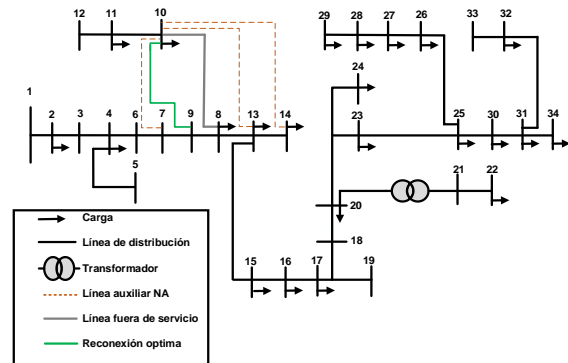


Figura 20. Sistema reconfigurado - Caso 1.

5.2 Contingencia línea 25-26

Para el segundo caso de estudio se simula una contingencia en la línea 25-26, frente a este problema se procede a crear las posibles reconexiones para restaurar el servicio, siendo las líneas 26-24, 26-23, 26-30 y 26-31, como se muestra en la Figura 11.

Dentro de la Figura 21 se expone la cargabilidad del sistema inicial junto con la solución óptima, en donde el AG indica que la línea 24-26 es la mejor solución para restaurar el servicio, ya que presenta una cargabilidad que no supera el 70%. Sin embargo, se aprecia que la zona que se quedó sin energía, se considera una zona crítica y esto se refleja en la cargabilidad, puesto que en algunas líneas supera las del caso inicial pero no exceden el 100%.

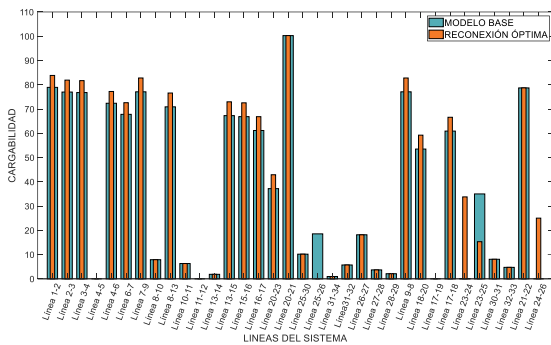


Figura 21. Cargabilidad. Caso base - Solución óptima.

La Figura 22 expone los perfiles de voltaje del caso, antes de la contingencia representada de color azul, junto con el resultado del AG el cual indica la solución óptima; y se aprecia que los voltajes que se presentan, en la nueva reconfiguración son bajos frente a los iniciales. Sin embargo, está dentro de los límites permitidos y a su vez cumple con las restricciones.

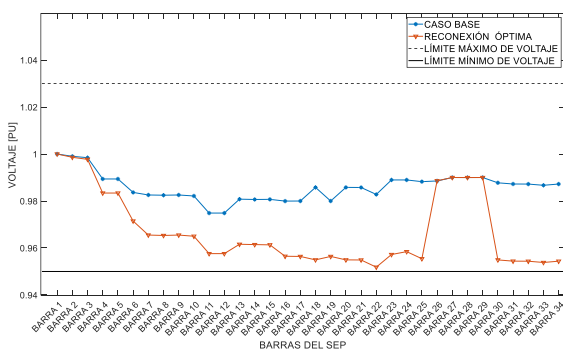


Figura 22. Perfiles de voltaje. Caso Base - Solución óptima.

Para finalizar el presente caso de estudio en la Figura 23 se indica el sistema con la nueva conexión.

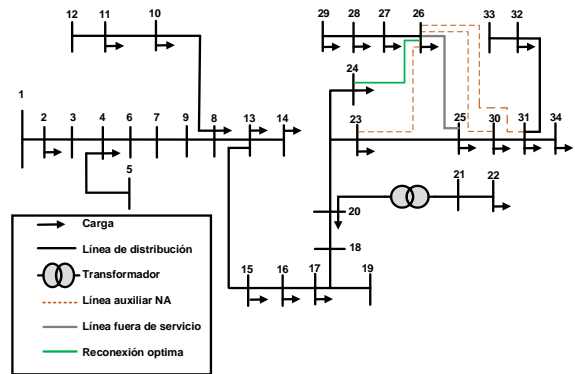


Figura 23. Sistema reconfigurado - Caso 2.

5.3 Contingencia línea 25-30

En el tercer caso de estudio se simula una contingencia en la línea 25-30, frente a este problema se procede a crear las posibles reconexiones para restaurar el servicio, que son las líneas 30-25, 30-26, 31-27 y 30-20 como se aprecia en la Figura 12.

El resultado del AG, indica que línea 26-30 es la óptima para restaurar el servicio y esta se encuentra expuesta en la Figura 24 la cual representa la cargabilidad del sistema base, junto con la solución óptima, en donde la línea 25-26, es la que presenta un cambio significativo. Sin embargo, no es un problema porque la cargabilidad no está en niveles que dañen al conductor.

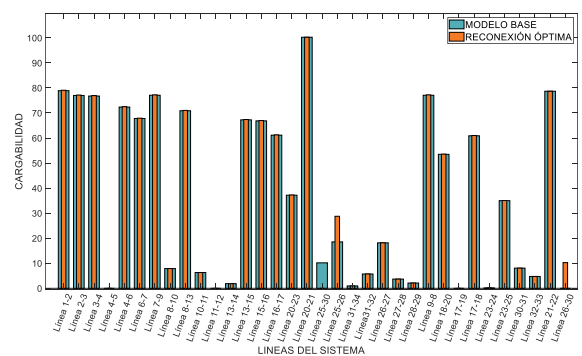


Figura 24. Cargabilidad. Caso base - Solución óptima.

Los resultados respecto a los perfiles de voltaje de la solución óptima se presentan en la Figura 25, junto con el caso base. Dentro de la gráfica se identifica el nuevo perfil voltaje con la óptima reconexión, representada de color azul, en donde se

observa que en las barras 30, 31, 32 y 34; existe una caída de voltaje. No obstante, están dentro de los límites establecidos.

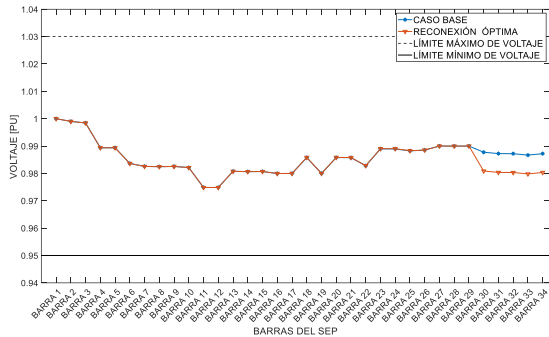


Figura 25. Perfiles de voltaje. Caso Base - Solución óptima.

Para finalizar el presente caso, en la Figura 26 se expone el sistema con la nueva conexión, es decir, el sistema reconfigurado.

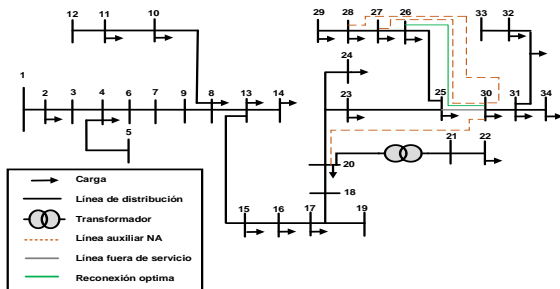


Figura 26. Sistema reconfigurado - Caso 3.

5.4 Contingencia línea 30-31

En el cuarto caso de estudio se simula una contingencia en la línea 30-31, frente a este problema se proceden a crear las posibles reconexiones para restaurar el servicio, que son las líneas 31-25, 31-26, 31-27 y 31-28; como se aprecia en la Figura 13.

En la Figura 27, se presenta el resultado del AG respecto a la cargabilidad, en dónde se logra apreciar que la solución óptima para restaurar el servicio es la línea 28-31, la cual no supera la cargabilidad del 70%. Pese a que, las líneas 25-26, 26-27, 27-28 tiene una elevación, pero no representa inconvenientes ya que poseen una cargabilidad baja y el comportamiento del

resto de las líneas frente a la nueva conexión tienen variaciones pequeñas.

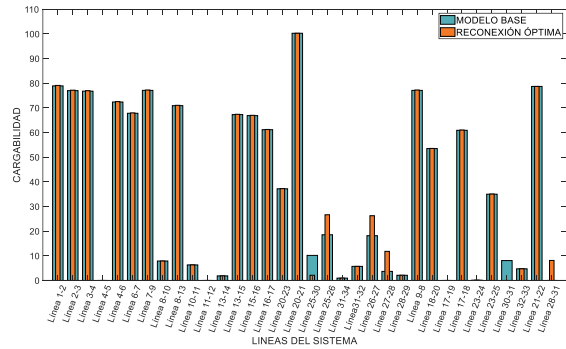


Figura 27. Cargabilidad. Caso base - Solución óptima.

La Figura 28, expone los resultados del AG respecto a los perfiles de voltaje, en donde se puede verificar que están dentro de los límites establecidos; y no existe gran variación frente al sistema inicial, con esto se valida que la línea 28-31 es la óptima conexión para restaurar el servicio.

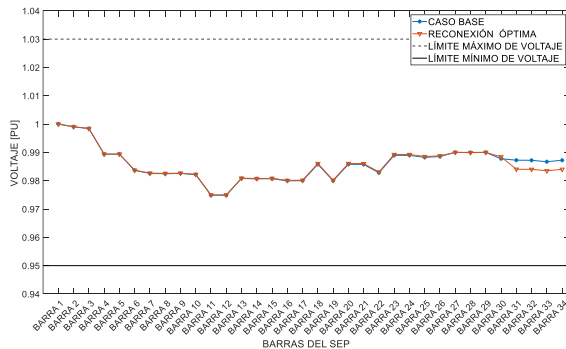


Figura 28. Perfiles de voltaje. Caso Base - Solución óptima.

Para terminar con el caso de estudio en la Figura 28 se presenta el sistema reconfigurado en donde se logra apreciar la conexión de la línea 28-31.

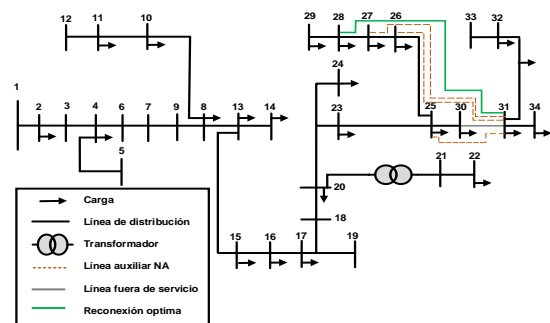


Figura 29. Sistema reconfigurado - Caso 4.

6 Conclusiones

El algoritmo desarrollado permite encontrar la óptima reconfiguración de una manera eficiente para la restauración del servicio ante una contingencia, teniendo en cuenta la capacidad de carga de los conductores y los perfiles de voltaje; mismas que son importantes para asegurar la calidad de la energía suministrada.

Se pudo verificar, que el algoritmo genético es una herramienta informática importante, que permite guiar a los operadores para tomar decisiones eficientes al momento de restaurar el servicio eléctrico después de una contingencia en la red de distribución. Esto asegura que la energía sea restablecida de manera eficaz hacia los usuarios afectados, optimizando así el proceso de recuperación del sistema.

El algoritmo implementado, permitió categorizar las posibles reconexiones para restaurar el servicio, gracias a su naturaleza estocástica que permite localizar la óptima reconfiguración en un amplio y diverso espacio de búsqueda, en el cual existen diferentes escenarios los cuales se ven reducidos cuando deben cumplir con un modelo matemático establecido, puesto que este estará parametrizado y permite encontrar de una manera más eficaz la solución óptima.

6.1 Trabajos futuros

Se sugiere para trabajos futuros mejorar el algoritmo en donde se pueda determinar el lugar óptimo de los dispositivos de conexión y el costo que representa para la red.

Para finalizar, se sugiere también, explorar otra metodología para encontrar la óptima reconfiguración en los sistemas eléctricos de distribución ante contingencias, empleando algoritmos metaheurísticos de recocido simulado y búsqueda tabú.

7 Referencias

- [1] W. M. Dahalan and H. Mokhlis, "Network reconfiguration for loss reduction with distributed generations using PSO," *PECon 2012 - 2012 IEEE Int. Conf. Power Energy*, no. December, pp. 823–828, 2012, doi: 10.1109/PECon.2012.6450331.
- [2] M. A. Tavakoli Ghazi Jahani, P. Nazarian, A. Safari, and M. R. Haghifam, "Multi-objective optimization model for optimal reconfiguration of distribution networks with demand response services," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 47, no. November 2018, p. 101514, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101514.
- [3] R. A. Jacob and J. Zhang, "Distribution network reconfiguration to increase photovoltaic hosting capacity," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2020-Augus, 2020, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281922.
- [4] N. S. Galat and P. M. Sonawane, "Distribution system feeder reconfiguration by robust optimization method, objectives and solution methods," *Proc. 2017 Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst. ICICCS 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 248–251, 2017, doi: 10.1109/ICCONS.2017.8250719.
- [5] G. Zu, J. Xiao, H. Han, X. Xi, F. Meng, and W. Ju, "Region-based model of distribution network reconfiguration under Single contingency," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2019-Augus, 2019, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973826.
- [6] J. Liu, Q. Zhang, J. Li, and Y. Wang, "An iterative heuristic method to

- determine radial topology for Distribution System Restoration,” *Proc. 2021 IEEE 4th Int. Electr. Energy Conf. CIEEC 2021*, 2021, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510530.
- [7] A. Mendes, N. Boland, P. Guiney, and C. Riveros, “(N-1) contingency planning in radial distribution networks using genetic algorithms,” *2010 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. T D-LA 2010*, vol. 1, pp. 290–297, 2011, doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762896.
- [8] P. Meneses De Quevedo, J. Contreras, M. J. Rider, and J. Allahdadian, “Contingency assessment and network reconfiguration in distribution grids including wind power and energy storage,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1524–1533, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2453368.
- [9] O. Bassegy, K. L. Butler-Purpy, and B. Chen, “Dynamic modeling of sequential service restoration in islanded single master microgrids,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 202–214, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2929268.
- [10] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohamed, S. F. Mekhamer, and M. A. L. Badr, “Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 8, pp. 943–953, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2010.01.001.
- [11] A. O. Salau, Y. W. Gebru, and D. Bitew, “Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems,” *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04233, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04233.
- [12] hdi M. Milad Kabirifar, Azin Shojaei, “Distribution system reconfiguration using heuristic method and enhanced genetic algorithm with fuzzy sets objectives,” *2015 23rd Iran. Conf. Electr. Eng.*, pp. 1568–1573, 2015, doi: 10.1109/IranianCEE.2015.7146469.
- [13] A. Sam, S. S. Daraskar, H. V. Gotham, S. Pemmada, and N. R. Patne, “A novel multi-objective based optimal reconfiguration of a distribution etwork by a closed switch heuristic method,” *2022 Int. Conf. Intell. Controll. Comput. Smart Power, ICICCCSP 2022*, pp. 1–5, 2022, doi: 10.1109/ICICCCSP53532.2022.9862322.
- [14] ARCERNNR, “Resolución Nro. ARCERNNR -017/2020,” *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos No Renovable* . p. 7, 2020.
- [15] P. Estrat, “Plan Estratégico 2021-2025,” *CNELEP*, p. 75, 2021.
- [16] K. Zhang, R. Zhu, R. Song, F. Shi, S. Shi, and C. Fang, “A mesh analysis model and the coherent evaluation index system for urban distribution network planning,” *2021 3rd Asia Energy Electr. Eng. Symp. AEEES 2021*, pp. 443–447, 2021, doi: 10.1109/AEEES51875.2021.9402959.
- [17] D. Wang and X. Tai, “Optimized tie-line planning of distribution networks with explicit reliability constraints,” *2020 IEEE 4th Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Connect. Grids Towar. a Low-Carbon High-Efficiency Energy Syst. EI2 2020*, pp. 1632–1636, 2020, doi: 10.1109/EI250167.2020.9347204.
- [18] X. Jin, Y. Song, W. Yang, Y. Lv, and Z. Li, “Research on planning strategy to achieve high reliability for urban distribution systems,” *Proc. 2019*

- IEEE 3rd Int. Electr. Energy Conf. CIEEC 2019*, pp. 1143–1147, 2019, doi: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019421.
- [19] Y. Liu, “Distribution network optimization planning based on genetic algorithms,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1881, no. 3, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1881/3/032094.
- [20] E. B. Herrera-cisneros and E. M. Inga-ortega, “Optimal overhead distribution network planning based graph theory,” *SciELO - Sci.*, vol. 15, pp. 122–130, 2018, doi: 10.15332/iteckne.v15i2.2073.
- [21] H. Bao *et al.*, “Optimal investment planning of distribution network considering customers’ Reliability Requirements,” *2019 3rd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Ubiquitous Energy Netw. Connect. Everything, EI2 2019*, pp. 577–582, 2019, doi: 10.1109/EI247390.2019.9061910.
- [22] M. A. G. Clark, I. De M. G. Neves, A. S. Sousa, and M. E. Marcos, “Reconfiguration of distribution systems aiming for accumulated impedance balancing among feeders through genetic algorithm,” *2019 6th Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2019*, pp. 1185–1190, 2019, doi: 10.1109/CoDIT.2019.8820701.
- [23] G. Yue, Z. Juan, N. Shiyuan, and K. Xiangyu, “Distribution network economic dispatch based on network reconfiguration and electric-heat combined demand response,” *2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019*, pp. 1810–1815, 2019, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881095.
- [24] W. Mariño, J. Muñoz, M. Jaramillo, C. Barrera-Singaña, and W. Pavón, “Distribution system reconfiguration for voltage profile improvement using enhanced particle swarm optimization,” *2023 IEEE IAS Glob. Conf. Renew. Energy Hydrog. Technol. GlobConHT 2023*, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087590.
- [25] H. Di, Y. Bao, and B. Wang, “Research on distribution network reconfiguration based on deep Q-learning network,” *2020 IEEE 4th Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. Connect. Grids Towar. a Low-Carbon High-Efficiency Energy Syst. EI2 2020*, pp. 2728–2732, 2020, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346939.
- [26] I. Dukovska, J. Morren, and H. J. G. Sloopweg, “Switching sequence optimization for service restoration in distribution networks,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, vol. 2020-Octob, pp. 6–10, 2020, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248817.
- [27] A. K. Saonerkar, A. S. Pande, P. G. Sharma, S. Tiwari, and B. Y. Bagde, “Optimized distribution loss evaluation in ring main distribution system with DG placement, reconfiguration and capacitor placement using GA,” *Proc. Int. Conf. Inven. Comput. Technol. ICICT 2016*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1109/INVENTIVE.2016.7830235.
- [28] R. Vargas, R. Romero, and J. F. Franco, “Biased random-Key genetic algorithm applied to the optimal reconfiguration of radial distribution systems,” *Proc. 2018 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Exhib. - Lat. Am. TD-LA 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511718.
- [29] A. Hamioud and P. K. Sebaa, “Genetic algorithms for the reconfiguration of electrical distribution networks,” *2019 Int.*

- Conf. Adv. Electr. Eng. ICAEE 2019*, no. 1, 2019, doi: 10.1109/ICAEE47123.2019.9015194.
- [30] J. Peñaloza, J. Yumbla, J. López, and A. Padilha-Feltrin, “Optimal distribution network reconfiguration with distributed generation using a genetic algorithm,” *2019 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT Lat. Am. 2019*, pp. 0–5, 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895354.
- [31] S. Eng, O. Penangsang, R. S. Wibowo, I. Suryawati, and C. Chhlonh, “Distribution system restoration using spanning tree based on depth first search visual in GUI,” *Proc. - 2019 5th Int. Conf. Sci. Technol. ICST 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICST47872.2019.9166413.
- [32] S. Pal, S. Sen, and S. Sengupta, “Power network reconfiguration for congestion management and loss minimization using Genetic Algorithm,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2015, no. CP683, pp. 291–296, 2015, doi: 10.1049/cp.2015.1646.
- [33] V. A. Ageev, K. A. Dushutin, P. A. Volgushev, and A. I. Burnaev, “Application of the genetic algorithm during electric network mode optimization,” *Proc. 2nd 2020 Int. Youth Conf. Radio Electron. Electr. Power Eng. REEPE 2020*, pp. 15–18, 2020, doi: 10.1109/REEPE49198.2020.9059218.
- [34] P. R. Babu, S. Pasunuru, and G. Vaishnavi, “Genetic algorithm and reconfiguration for loss minimization in radial distribution system,” *2017 Int. Conf. Smart Grids, Power Adv. Control Eng. Icspace. 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 294–297, 2018, doi: 10.1109/ICSPACE.2017.8343446.
- [35] D. Goncharenko *et al.*, “Genetic algorithm for solution of the problem of optimal location of the distributed electrical networks,” *2020 10th Int. Conf. Adv. Comput. Inf. Technol. ACIT 2020 - Proc.*, no. 3, pp. 380–385, 2020, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208888.
- [36] A. Ioaneş and R. Tîrnovan, “Optimum reconfiguration of power networks to reduce losses using genetic algorithm,” *Proc. - 2017 Int. Conf. Mod. Power Syst. MPS 2017*, no. Mps, 2017, doi: 10.1109/MPS.2017.7974398.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 2: Matriz de estado del arte.

RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE CONTINGENCIAS CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD A TRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO																						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA					
			REFERENCIA	CITAS	Problema; Objetivo	RECONFIGURACIÓN DE LA RED EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	PLANIFICACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	LINEAS DE DISTRIBUCIÓN	OPTIMIZACIÓN PARA LA RESTAURACIÓN DEL SERVICIO	RESTAURACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA	SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	OPTIMIZACIÓN MEDIANTE LA OPERACIÓN DE EQUIPOS	VOLTAJE	CARGABILIDAD DE CONDUCTORES	TOPOLOGÍA RADIAL	ALGORITMO GENÉTICO	EFICIENCIA DE LA RECONFIGURACIÓN	RECONFIGURACIÓN DE LA RED ANTE CONTINGENCIA	RECONFIGURACIÓN DE LA RED	IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO GENÉTICO	OPTIMIZACIÓN PARA LA RESTAURACIÓN DEL SERVICIO
1	2012	"Network Reconfiguration for loss reduction with distributed generations using PSO"	22	26	Si	☒				☒		☒	☒									
2	2019	"Multi-objective optimization model for optimal Reconfiguration of distribution networks with demand response services"	38	50	Si		☒									☒		☒				
3	2020	"Distribution network Reconfiguration to increase photovoltaic hosting capacity"	15	7	No	☒	☒						☒			☒		☒				
4	2017	Distribution system feeder Reconfiguration by robust optimization method, objectives and solution methods"	21	10	No	☒				☒		☒				☒						
5	2019	Region-based Model of Distribution Network Reconfiguration under Single Contingency"	16	66	Si	☒	☒						☒						☒			
6	2021	"An Iterative Heuristic Method to Determine Radial Topology for Distribution System Restoration"	18	10	No			☒						☒	☒				☒			
7	2011	"Contingency planning in radial distribution networks using genetic algorithms"	14	10	No	☒				☒		☒				☒		☒		☒		

RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE CONTINGENCIAS CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD A TRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO

8	2015	"Contingency Assessment and Network Reconfiguration in Distribution Grids Including Wind Power and Energy Storage"	38	60	No					⊗									⊗	⊗						⊗	
9	2020	"Dynamic Modeling of Sequential Service Restoration in Islanded Single Master Microgrids"	44	19	No		⊗								⊗					⊗	⊗						
10	2010	"Distribution system Reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm"	20	15	No							⊗				⊗	⊗	⊗	⊗								
11	2020	"Optimal network Reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems"	22	58	Si						⊗	⊗		⊗												⊗	
12	2015	"Distribution System Reconfiguration Using Heuristic Method and Enhanced Genetic Algorithm with Fuzzy Sets objectives"	16	2	No																					⊗	
13	2022	"A Novel Multi-Objective based Optimal Reconfiguration of A Distribution Network by A Closed Switch Heuristic Method"	20	0	No						⊗	⊗	⊗							⊗	⊗					⊗	
14	2020	Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos No Renewable	0	0	No										⊗												
15	2021	Plan Estratégico CNELEP2021-2025	0	0	Si																						
16	2021	"A Mesh Analysis Model and the Coherent Evaluation Index System for Urban Distribution Network Planning"	6	3	Si																						
17	2020	"Optimized tie-line planning of distribution networks with explicit reliability constraints"	30	0	Si																						⊗
18	2019	"Research on planning strategy to achieve high reliability for urban distribution systems"	11	6	Si																						⊗
19	2021	"Distribution Network Optimization Planning Based on Genetic Algorithms,"	10	0	No	⊗	⊗																			⊗	⊗
20	2018	"Optimal overhead distribution network planning-based graph theory"	23	5	No																					⊗	⊗
21	2019	"Optimal Investment Planning of Distribution Network Considering Customers' Reliability Requirements"	12	1	No																						
22	2019	"Reconfiguration of distribution systems aiming for accumulated impedance balancing among feeders through genetic algorithm"	10	4	Si																						⊗
23	2019	"Distribution Network Economic Dispatch Based on Network Reconfiguration and Electric heat Combined Demand Response,"	12	0	Si	⊗																					⊗

RECONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ANTE CONTINGENCIAS CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE CARGABILIDAD A TRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO

24	2023	"Distribution System Reconfiguration for Voltage Profile Improvement using Enhanced Particle Swarm Optimization"	15	0	Si														⊗		⊗				
25	2020	"Research on distribution network Reconfiguration based on deep Q-learning network"	15	1	Si			⊗	⊗		⊗													⊗	
26	2020	"Switching sequence optimization for service restoration in distribution networks"	13	0	Si							⊗	⊗	⊗	⊗				⊗						
27	2016	"Optimized distribution loss evaluation in ring main distribution system with DG placement, Reconfiguration and capacitor placement using GA"	17	5	Si		⊗												⊗		⊗		⊗		
28	2018	"Biased Random-Key Genetic Algorithm Applied to the Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems."	19	0	Si	⊗						⊗							⊗						
29	2019	"Genetic Algorithms for the Reconfiguration of Electrical Distribution Networks"	7	1	No							⊗									⊗			⊗	
30	2019	"Optimal Distribution Network Reconfiguration with Distributed Generation using a Genetic Algorithm"	19	0	Si				⊗	⊗											⊗				
31	2019	"Distribution system restoration using spanning tree based on depth first search visual in GUI,"	24	0	Si							⊗		⊗					⊗						⊗
32	2015	"Power network Reconfiguration for congestion management and loss minimization using Genetic Algorithm"	16	7	Si								⊗		⊗						⊗				
33	2020	"Application of the Genetic Algorithm During Electric Network Mode Optimization,"	8	3	Si		⊗														⊗				⊗
34	2017	"Genetic algorithm and Reconfiguration for loss minimization in radial distribution system,"	7	3																	⊗				⊗
35	2020	"Genetic Algorithm for Solution of the Problem of Optimal Location of the Distributed Electrical Networks"	27	1			⊗				⊗										⊗				⊗
36	2017	"Optimum Reconfiguration of power networks to reduce losses using genetic algorithm"	11	1	Si	⊗															⊗				⊗
		CANTIDAD:			SN	9	8	6	7	8	6	12	5	9	4	3	12	7	10	6	9	8			

7.2 Resumen de Indicadores

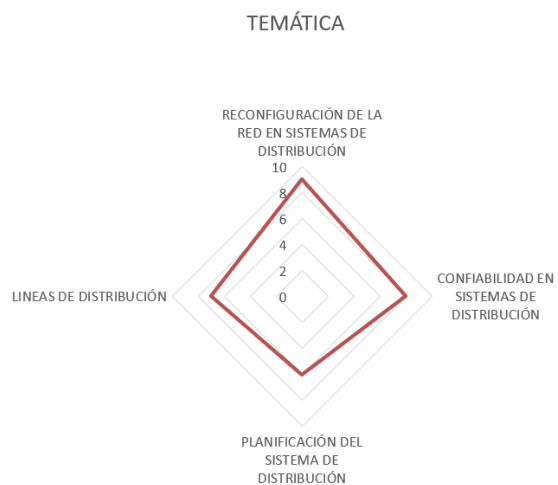


Figura 30. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

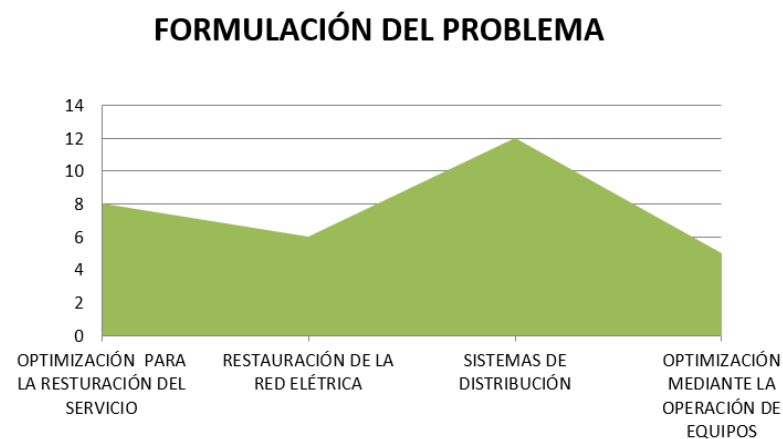


Figura 31. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

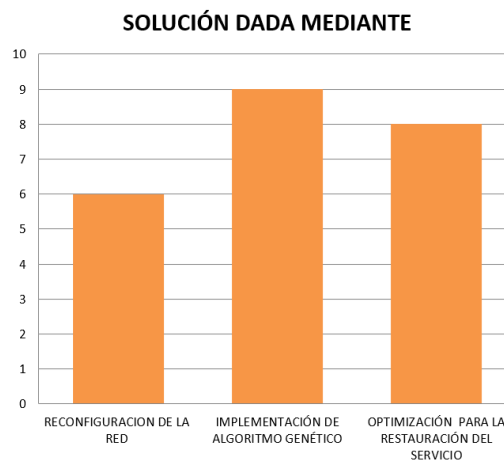


Figura 32. Indicador de solución - Estado del arte.

8 Anexos

Tabla 3. Datos de líneas del sistema IEEE de 34 barras.

Datos de línea			
Bus inicial	Bus final	Distancia ft	Configuración
1	2	2580	300
2	3	1730	300
3	4	32230	300
4	5	5804	303
4	6	37500	300
6	7	29730	300
7	9	10	301
8	10	1710	302
8	13	10210	301
10	11	48150	302
11	12	13740	302
13	14	3030	303
13	15	840	301
15	16	20440	301
15	17	520	301
16	23	4900	301
20	21	0	XFM
20	30	2020	301
25	26	280	301
25	34	860	301
31	32	280	301
31	27	1350	301
26	28	3640	301
27	29	530	301
28	8	310	301
9	20	10	301
18	19	23330	303
17	18	36830	301
17	24	1620	302
23	25	5830	301
30	31	2680	301
32	33	4860	304
21	22	10560	300

Tabla 4. Configuración de líneas

Configuración de las líneas				
Configuración	Por fases	Fase ACSR	Neutro ACSR	Espacio
300	BA CN	1/0	1/0	500
301	BA CN	#2 6/1	#2 6/1	500
302	AN	#4 6/1	#4 6/1	510
303	BN	#4 6/1	#4 6/1	510
304	BN	#2 6/1	#2 6/1	510

Tabla 5. Datos de cargas del sistema IEEE de 34 barras.

Cargas puntuales							
Nº Barra	Modelo de Carga	Ph-1 kW	Ph-1 kVAr	Ph-2 kW	Ph-2 kVAr	Ph-3 kW	Ph-4 kVAr
30	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
34	Y-I	9	7	9	7	9	7
27	Y-Z	135	105	135	105	135	105
29	D-PQ	20	16	20	16	20	16
22	D-I	150	75	150	75	150	75
16	D-Z	10	5	10	5	25	10

Cargas distribuidas								
Bus inicial	Bus final	Modelo de Carga	Ph-1 kW	Ph-1 kVAr	Ph-2 kW	Ph-2 kVAr	Ph-3 kW	Ph-3 kVAr
2	3	Y-PQ	-	-	30	15	25	14
4	5	Y-I	-	-	16	8	-	-
10	11	Y-Z	34	17	-	-	-	-
11	12	Y-PQ	135	17	-	-	-	-
8	13	D-I	-	-	5	2	-	-
13	14	Y-I	-	-	40	20	-	-
13	15	Y-PQ	-	-	-	-	4	2
15	16	Y-PQ	7	3	-	-	-	-
17	19	Y-PQ	-	-	4	2	-	-
20	23	D-Z	7	3	2	1	6	3
23	24	Y-PQ	2	1	-	-	-	-
23	25	D-PQ	4	2	15	8	13	7
25	30	D-Z	16	8	20	10	110	55
30	31	D-PQ	30	15	10	6	42	22
31	34	D-I	18	9	22	11	-	-
32	33	Y-PQ	-	0	28	14	-	-
26	27	Y-PQ	9	5	-	-	-	-
27	28	Y-PQ	-	-	25	12	20	11
28	29	Y-PQ	-	-	23	11	-	-

Tabla 6. Datos del transformador

Transformador					
	Potencia kVA	Kv-high	kV-low	R-%	X-%
Subestación	2500	69-D	24.9 – Gr. W	1	8
XFM-1	500	24.9 - Gr.W	4.16 – Gr. W	1.9	4.08

Tabla 7. Datos de los voltajes iniciales.

Voltajes iniciales					
Barra	Voltaje [pu]	Ángulo (°)	Barra	Voltaje [pu]	Ángulo (°)
1	1	0	18	0,986	-20,26
2	0,999	-0,27	19	0,980	-15,38
3	0,998	-0,45	20	0,986	-20,26
4	0,989	-3,85	21	0,986	-20,26
5	0,989	-3,85	22	0,983	-20,32
6	0,984	-7,86	23	0,989	-20,89
7	0,983	-11,05	24	0,989	-20,89
8	0,982	-11,10	25	0,988	-21,53
9	0,983	-11,05	26	0,989	-21,57
10	0,982	-11,09	27	0,990	-21,73
11	0,975	-11,10	28	0,990	-21,76
12	0,975	-11,10	29	0,990	-21,76
13	0,981	-12,46	30	0,988	-21,54
14	0,981	-12,46	31	0,987	-21,54
15	0,981	-12,57	32	0,987	-21,54
16	0,980	-15,31	33	0,987	-21,55
17	0,980	-15,38	34	0,987	-21,54

Tabla 8. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso1.

Voltajes después de la Reconfiguración.			
Barra	Voltaje [pu]	Barra	Voltaje [pu]
1	1	18	0,986
2	0,999	19	0,980
3	0,998	20	0,986
4	0,989	21	0,986
5	0,989	22	0,983
6	0,984	23	0,989
7	0,983	24	0,989
8	0,982	25	0,988
9	0,983	26	0,989
10	0,978	27	0,990
11	0,971	28	0,990
12	0,971	29	0,990
13	0,981	30	0,988
14	0,981	31	0,987
15	0,981	32	0,987
16	0,980	33	0,987
17	0,980	34	0,987

Tabla 9. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso1.

Cargabilidad después de la Reconfiguración.			
Líneas	Cargabilidad (%)	Líneas	Cargabilidad (%)
Línea 1-2	78,90	Línea 25-30	10,16
Línea 2-3	76,97	Línea 25-26	18,53
Línea 3-4	76,76	Línea 31-34	0,95
Línea 4-5	0,00	Línea31-32	5,71
Línea 4-6	72,35	Línea 26-27	18,15
Línea 6-7	67,79	Línea 27-28	3,68
Línea 7-9	77,08	Línea 28-29	2,10
Línea 8-10	0,00	Línea 9-8	71,12
Línea 8-13	70,88	Línea 18-20	53,49
Línea 10-11	6,30	Línea 17-19	0,00
Línea 11-12	0,00	Línea 17-18	60,89
Línea 13-14	1,85	Línea 23-24	0,09
Línea 13-15	67,26	Línea 23-25	34,99
Línea 15-16	66,84	Línea 30-31	8,06
Línea 16-17	61,14	Línea 32-33	4,73
Línea 20-23	37,17	Línea 21-22	78,70
Línea 20-21	100,25	Línea 9-10	5,97

Tabla 10. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso2.

Voltajes después de la Reconfiguración.			
Barra	Voltaje [pu]	Barra	Voltaje [pu]
1	1,000	18	0,955
2	0,999	19	0,956
3	0,998	20	0,955
4	0,983	21	0,955
5	0,983	22	0,952
6	0,971	23	0,957
7	0,966	24	0,958
8	0,965	25	0,955
9	0,966	26	0,989
10	0,965	27	0,990
11	0,958	28	0,990
12	0,958	29	0,990
13	0,962	30	0,955
14	0,961	31	0,954
15	0,961	32	0,954
16	0,956	33	0,954
17	0,956	34	0,954

Tabla 11. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso 2.

Cargabilidad después de la Reconfiguración.			
Líneas	Cargabilidad (%)	Líneas	Cargabilidad (%)
Línea 1-2	83,84	Línea 25-30	10,16
Línea 2-3	81,91	Línea 25-26	0,00
Línea 3-4	81,69	Línea 31-34	0,95
Línea 4-5	0,00	Línea31-32	5,71
Línea 4-6	77,23	Línea 26-27	18,14
Línea 6-7	72,60	Línea 27-28	3,68
Línea 7-9	82,79	Línea 28-29	2,10
Línea 8-10	7,88	Línea 9-8	82,79
Línea 8-13	76,59	Línea 18-20	59,22
Línea 10-11	6,30	Línea 17-19	0,00
Línea 11-12	0,00	Línea 17-18	66,60
Línea 13-14	1,85	Línea 23-24	33,77
Línea 13-15	72,96	Línea 23-25	15,31
Línea 15-16	72,55	Línea 30-31	8,06
Línea 16-17	66,84	Línea 32-33	4,73
Línea 20-23	42,90	Línea 21-22	78,71
Línea 20-21	100,27	Línea 9-10	25,01

Tabla 12. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso 3.

Voltajes después de la Reconfiguración.			
Barra	Voltaje [pu]	Barra	Voltaje [pu]
1	1	18	0,986
2	0,999	19	0,980
3	0,998	20	0,986
4	0,989	21	0,986
5	0,989	22	0,983
6	0,984	23	0,989
7	0,983	24	0,989
8	0,983	25	0,989
9	0,983	26	0,989
10	0,982	27	0,990
11	0,975	28	0,990
12	0,975	29	0,990
13	0,981	30	0,988
14	0,981	31	0,984
15	0,981	32	0,984
16	0,980	33	0,983
17	0,980	34	0,984

Tabla 13. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso 3.

Cargabilidad después de la Reconfiguración.			
Líneas	Cargabilidad (%)	Líneas	Cargabilidad (%)
Línea 1-2	79,10	Línea 25-30	2,10
Línea 2-3	77,18	Línea 25-26	26,64
Línea 3-4	76,96	Línea 31-34	0,95
Línea 4-5	0,00	Línea31-32	5,71
Línea 4-6	72,53	Línea 26-27	26,26
Línea 6-7	67,94	Línea 27-28	11,80
Línea 7-9	77,23	Línea 28-29	2,10
Línea 8-10	7,88	Línea 9-8	77,23
Línea 8-13	71,03	Línea 18-20	53,55
Línea 10-11	6,30	Línea 17-19	0,00
Línea 11-12	0,00	Línea 17-18	61,00
Línea 13-14	1,85	Línea 23-24	0,09
Línea 13-15	67,40	Línea 23-25	35,04
Línea 15-16	66,98	Línea 30-31	0,00
Línea 16-17	61,25	Línea 32-33	4,73
Línea 20-23	37,23	Línea 21-22	78,70
Línea 20-21	100,25	Línea 9-10	8,12

Tabla 14. Datos de voltajes después de la reconfiguración – Caso 4.

Voltajes después de la Reconfiguración.			
Barra	Voltaje [pu]	Barra	Voltaje [pu]
1	1,000	18	0,986
2	0,999	19	0,980
3	0,998	20	0,986
4	0,989	21	0,986
5	0,989	22	0,983
6	0,984	23	0,989
7	0,983	24	0,989
8	0,982	25	0,988
9	0,983	26	0,989
10	0,982	27	0,990
11	0,975	28	0,990
12	0,975	29	0,990
13	0,981	30	0,981
14	0,981	31	0,980
15	0,981	32	0,980
16	0,980	33	0,980
17	0,980	34	0,980

Tabla 15. Cargabilidad después de la reconfiguración - Caso 4.

Cargabilidad después de la Reconfiguración.			
Líneas	Cargabilidad (%)	Líneas	Cargabilidad (%)
Línea 1-2	79,09	Línea 25-30	0,00
Línea 2-3	77,16	Línea 25-26	28,76
Línea 3-4	76,95	Línea 31-34	0,95
Línea 4-5	0,00	Línea 31-32	5,71
Línea 4-6	72,52	Línea 26-27	18,15
Línea 6-7	67,94	Línea 27-28	3,68
Línea 7-9	77,23	Línea 28-29	2,10
Línea 8-10	7,88	Línea 9-8	77,23
Línea 8-13	71,04	Línea 18-20	53,57
Línea 10-11	6,30	Línea 17-19	0,00
Línea 11-12	0,00	Línea 17-18	61,01
Línea 13-14	1,85	Línea 23-24	0,09
Línea 13-15	67,40	Línea 23-25	35,06
Línea 15-16	66,99	Línea 30-31	8,06
Línea 16-17	61,26	Línea 32-33	4,73
Línea 20-23	37,25	Línea 21-22	78,70
Línea 20-21	100,25	Línea 9-10	10,26